UNIVERSIDADE METODISTA DE PIRACICABA

FACULDADE DE ENGENHARIA, ARQUITETURA E URBANISMO

PROGRAMA DE PÓS GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA DE PRODUÇÃO

ESTUDO DA CONFIABILIDADE DE MÁQUINAS CNC COMO FATOR DETERMINANTE PARA A ESCOLHA DA POLÍTICA DE MANUTENÇÃO: UM ESTUDO DE CASO

WILSON ROBERTO MARCORIN

ORIENTADOR: PROF. DR. CARLOS ROBERTO CAMELLO LIMA

SANTA BÁRBARA D'OESTE

2005

UNIVERSIDADE METODISTA DE PIRACICABA

FACULDADE DE ENGENHARIA, ARQUITETURA E URBANISMO

PROGRAMA DE PÓS GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA DE PRODUÇÃO

ESTUDO DA CONFIABILIDADE DE MÁQUINAS CNC COMO FATOR DETERMINANTE PARA A ESCOLHA DA POLÍTICA DE MANUTENÇÃO: UM ESTUDO DE CASO

WILSON ROBERTO MARCORIN

ORIENTADOR: PROF. DR. CARLOS ROBERTO CAMELLO LIMA

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Produção, da Faculdade de Engenharia, Arquitetura e Urbanismo, da Universidade Metodista de Piracicaba – UNIMEP, como requisito para obtenção do Título de Mestre em Engenharia de Produção.

SANTA BÁRBARA D'OESTE

2005

FICHA CATALOGRÁFICA ELABORADA PELA BIBLIOTECA DO CAMPUS DE SANTA BÁRBARA D'OESTE – UNIMEP

M321e

Marcorin, Wilson Roberto.
Estudo da confiabilidade de máquinas CNC como fator determinante para a escolha da política de manutenção: um estudo de caso./Wilson Roberto Marcorin.– Santa Bárbara d'Oeste, SP:[s.n.], 2005.

Orientador: Carlos Roberto Camello Lima
Dissertação (Mestrado)– Universidade Metodista de Piracicaba, Faculdade de Engenharia, Arquitetura e Urbanismo, Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Produção.

1. Manutenção. 2. Confiabilidade. 3. MTBF. 4. RCM. 5. CNC. I. Lima, Carlos Roberto Camello. II. Universidade Metodista de Piracicaba, Faculdade de Engenharia, Arquitetura e Urbanismo, Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Produção. III. Título.

ESTUDO DA CONFIABILIDADE DE MÁQUINAS CNC COMO FATOR DETERMINANTE PARA A ESCOLHA DA POLÍTICA DE MANUTENÇÃO: UM ESTUDO DE CASO

WILSON ROBERTO MARCORIN

Dissertação de Mestrado defendida e aprovada, em 27 de janeiro de 2005, pela Banca Examinadora constituída pelos Professores:

Prof. Dr. Carlos Roberto Camello Lima, Presidente
UNIMEP

Prof. Dr. Renato Vairo Belhot
EESC - USP

Prof. Dr. Álvaro José Abackerli
UNIMEP

À minha família:

Meus filhos Letícia e Vinícius,

pela compreensão;

Minha esposa Gisela, pelo carinho e apoio.

AGRADECIMENTOS

A Deus

Por me acompanhar, mesmo quando eu não me lembrava dele.

Ao meu orientador

Pela confiança depositada neste aluno.

À Indústrias Romi S.A.

Por ter proporcionado esta oportunidade.

O degrau de uma escada não serve simplesmente

para que alguém permaneça em cima dele.

Destina-se a sustentar o pé de um homem pelo tempo suficiente

para que ele coloque o outro um pouco mais alto.

Thomas Huxley

SUMÁRIO

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

BDD	*Binary Decision Diagram*
BM	*Breakdown Maintenance*
CBM	*Condition-Based Maintenance*
CCA	*Cause-Consequence Analysis*
CNC	Comando Numérico Computadorizado
FMEA	*Failure Mode and Effect Analysis*
FTA	*Fault Tree Analysis*
f(t)	Função Densidade de Probabilidade
ISO	*International Organization for Standardization*
MCC	Manutenção Centrada em Confiabilidade
MFOP	*Maintenance Free Operation Period*
MTBF	*Mean Time Between Failures*
MTTR	*Mean Time To Repair*
MTTS	*Mean Time To Support*
NLP	*Neuro Linguistic Programming*
PDCA	*Plan, Do, Check, Act*
QFD	*Quality Function Deployment*
Q&R	*Quality and Reliability*
RCA	*Root Cause Analysis*
RCI	*Reliability Critical Items*
RCM	*Reliability-Centred Maintenance*
R&M	*Reliability and Maintainability*
RMP	*Risk Management Process*
R(t)	Função de Confiabilidade de *t*
SAE	*Society of Automotive Engineering*
TBM	*Time-Based Maintenance*
TGR/TGW	*Things going right / things going wrong*
ti	i-ésimo elemento de uma amostra
TPM	*Total Productive Maintenance*
TRM	*Total Reliability Management*
WCM	*World Class Maintenance*

LISTA DE FIGURAS

LISTA DE TABELAS

MARCORIN, Wilson Roberto. ***Estudo da confiabilidade de máquinas CNC como fator determinante para a escolha da política de manutenção: um estudo de caso.*** 2005. 100 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Produção) – Faculdade de Engenharia, Arquitetura e Urbanismo, Universidade Metodista de Piracicaba, Santa Bárbara d'Oeste.

RESUMO

Muitas são as políticas, técnicas e ferramentas que são apresentadas como soluções para os problemas de manutenção. Programas complexos para o gerenciamento da manutenção, como TPM e RCM, e mesmo outros mais simples, como o 5S, são aplicados em grande parte das empresas que buscam excelência nesta área. A aplicação destas políticas, técnicas, ferramentas e programas requer uma análise das possibilidades de cada um deles e sua aplicabilidade em cada sistema, linha de produção ou máquina-alvo. Requer, ainda, uma análise do comportamento das falhas apresentadas por estes elementos, de modo a direcionar as melhores ações de manutenção para cada modo de falha. Este trabalho apresenta uma revisão das diversas políticas, técnicas e ferramentas de manutenção sob uma óptica gerencial. Apresenta, também, uma discussão sobre os custos de manutenção e os custos da não-manutenção, além da sua influência na escolha e gestão das políticas de manutenção. Apresenta, principalmente, uma discussão sobre a aplicação de conceitos de confiabilidade como fator norteador da escolha da melhor política de manutenção para cada caso. Finalmente, o trabalho apresenta um estudo de caso onde foram aplicados os conceitos de confiabilidade na escolha da política de manutenção para um novo projeto de máquinas-ferramenta CNC. O resultado deste caso mostra que o estudo de confiabilidade pode efetivamente direcionar a escolha das ações de manutenção de equipamentos, constituindo-se em ferramenta importante no planejamento da manutenção.

PALAVRAS-CHAVE: Manutenção, Confiabilidade, MTBF, RCM, CNC.

MARCORIN, Wilson Roberto. ***Estudo da confiabilidade de máquinas CNC como fator determinante para a escolha da política de manutenção: um estudo de caso.*** 2005. 100 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Produção) – Faculdade de Engenharia, Arquitetura e Urbanismo, Universidade Metodista de Piracicaba, Santa Bárbara d'Oeste.

ABSTRACT

Many maintenance policies, techniques and tools are introduced as solutions to maintenance problems. Complex programs for maintenance management as TPM and RCM, and even other simpler techniques such as 5S, are widely applied in many companies trying to get excellence in this area. The application of any of these maintenance policies, techniques, tools and programs requires an analysis of all the possibilities that each one can offer and their application on each system, production line or machine. It also requires an analysis of failure behavior for those elements to drive the best maintenance actions for each failure mode. This work presents a review of some maintenance programs, techniques and tools under a management perspective. It also presents a discussion about maintenance and non-maintenance costs and their influence on choosing and managing maintenance policies. It mainly focuses the application of reliability concepts to drive the choice of the best maintenance actions for each case. Finally, a case study of reliability application is presented, regarding to a new CNC machine tools project and their maintenance policies choice. The results of this case study show that the reliability study can effectively drive the choice of maintenance actions as an important instrument for maintenance planning.

KEYWORDS: *Maintenance, Reliability, MTBF, RCM, CNC machine tool.*

1. INTRODUÇÃO

Muito já foi escrito e discutido sobre o papel da função manutenção no desempenho da produção, tanto sob a óptica da produtividade, quanto da qualidade. A manutenção vem recebendo uma atenção cada vez maior à medida que passa a ser encarada como um pilar importante da gestão da produção, como uma ferramenta imprescindível para se atingir os objetivos traçados no âmbito da produção.

A função estratégica da manutenção já foi apresentada por diversos autores e foi tema de diversos trabalhos referenciados ao longo deste trabalho. Esta visão gerencial da manutenção é que permite que ela seja encarada como ferramenta de gestão e não mais como uma função marginal, como normalmente se consideravam todas as atividades relacionadas com a função manutenção.

Sob esta visão estratégica e gerencial da manutenção, foram elaboradas políticas, técnicas, ferramentas e modelos matemáticos capazes de conduzir suas ações de modo cada vez mais integrado com a produção, de maneira a permitir que a produção se desenvolva dentro dos altos padrões de produtividade e qualidade almejados.

Entre as diversas políticas, técnicas e ferramentas de manutenção, pode-se citar desde planos genéricos de manutenção preventiva e preditiva, até programas de gestão mais elaborados, como o TPM – *Total Productive Maintenance* (ou Manutenção Produtiva Total) e o RCM – *Reliability-Centred Maintenance* (ou Manutenção Centrada em Confiabilidade). Todas estas políticas e técnicas podem auxiliar as empresas a conseguirem um alto nível de excelência na manutenção, com consequências sensíveis nos resultados de produção. Ao mesmo tempo, todas estas políticas existentes colocam os programadores de manutenção em um dilema: que política utilizar? E ainda, com que freqüência aplicar cada ação de manutenção? Como escolher a

melhor política de manutenção para cada caso, de modo a obter os melhores resultados em termos de disponibilidade dos equipamentos a custos reduzidos?

A aplicação de políticas de manutenção preventiva e preditiva deve ser criteriosa, evitando que as ações de manutenção sejam planejadas sem um critério adequado, principalmente na definição da periodicidade das intervenções. A falta de critério nestas definições leva a custos excessivos, quer devidos ao excesso de falhas, quer devidos ao excesso de intervenções. Esta falta de critérios adequados pode ocorrer quando as políticas de manutenção são definidas a partir de outros fatores que não levam em consideração o comportamento das falhas.

As técnicas de manutenção baseadas em conceitos de confiabilidade também adquiriram força ao longo dos anos, principalmente pela forma mais científica com que se trata a manutenção, proporcionando melhores ferramentas para sua gestão. A aplicação destes conceitos de confiabilidade permite uma análise mais criteriosa de cada equipamento e, desta forma, permite também que a política de manutenção seja conduzida de modo mais aplicado a cada equipamento, levando-se em conta suas particularidades intrínsecas de projeto, seu histórico e sua função no processo de produção.

O comportamento das falhas, quando inseridas em um estudo de confiabilidade, pode indicar o melhor caminho a trilhar pelo programador de manutenção na busca da redução de falhas sem um aumento excessivo dos custos de manutenção. Este trabalho busca apresentar o estudo de confiabilidade como ferramenta de suporte ao programador de manutenção em sua busca por melhores resultados. Um estudo de caso é apresentado, procurando evidenciar de que forma os estudos de confiabilidade de equipamentos podem responder as questões levantadas, referentes ás dificuldades na escolha das melhores ações de manutenção e na definição da periodicidade das intervenções.

1.1. OBJETIVO DO TRABALHO

O objetivo deste trabalho é apresentar o estudo da confiabilidade como ferramenta determinante para a escolha apropriada da política de manutenção de máquinas CNC, visando melhores resultados na disponibilidade de equipamentos e na qualidade da produção.

1.2. METODOLOGIA

Este trabalho foi elaborado a partir de uma revisão bibliográfica sobre os diversos tópicos abordados, utilizados para o embasamento teórico necessário para se atingir o objetivo proposto.

O trabalho procura responder as questões relacionadas à aplicabilidade dos conceitos de confiabilidade na gestão da manutenção. Para isso, lança mão do uso de ferramentas matemáticas, dados históricos de falhas colhidos em uma pesquisa documental e, principalmente, dados de falhas colhidos em um estudo de caso.

A pesquisa documental foi feita nos arquivos de assistência técnica de um fabricante de máquinas CNC. Nesta pesquisa, foram identificadas todas as falhas ocorridas durante o período de garantia de 3 modelos semelhantes de máquinas. Foram identificadas as falhas mais freqüentes e seus respectivos modos de falha. Para cada falha escolhida para o estudo, foram levantados os dados de confiabilidade e as curvas de probabilidade de falha. Com base nestes estudos de confiabilidade, foram definidas as ações de manutenção e sua periodicidade.

As ações e periodicidades definidas a partir do estudo de confiabilidade foram aplicadas a um novo conjunto de máquinas, também semelhantes aos modelos estudados. Este novo modelo foi acompanhado pelo autor desde a fase de projeto, até o período de um ano de operação. Foram colhidos os dados de falhas destes equipamentos e submetidos ao mesmo estudo de confiabilidade

dos modelos anteriores. Os resultados foram comparados com os dados obtidos nos modelos anteriores para avaliação da aplicabilidade dos conceitos de confiabilidade utilizados. As conclusões emitidas baseiam-se na literatura discutida e, fundamentalmente, nos dados reais de falhas colhidos no estudo de caso apresentado.

1.2.1. DELIMITAÇÃO, UNIVERSO E TIPOS DE DADOS DA PESQUISA

A pesquisa bibliográfica foi centrada em artigos escritos e publicados principalmente em jornais e revistas especializados em engenharia, manutenção e qualidade. Alguns livros e teses também foram consultados para a apresentação dos conceitos empregados no trabalho.

Para o estudo de caso, a pesquisa utiliza duas bases de dados distintas. A primeira refere-se a dados históricos de campo de um universo grande de máquinas com Comando Numérico Computadorizado (CNC), obtidos a partir de registros de assistência técnica do fabricante das máquinas, durante o período de garantia. A segunda base de dados refere-se a dados de campo coletados em um conjunto de máquinas CNC, similares às máquinas do primeiro universo, acompanhadas pelo autor em seu local de operação. As informações destes dois universos consistem de dados de falhas, suas causas e soluções adotadas.

1.2.2. ANÁLISE E INTERPRETAÇÃO DOS DADOS

Os dados obtidos foram tabulados e inseridos no *software* MINITAB® para obtenção de valores de confiabilidade e probabilidades de falha, utilizados na escolha das políticas de manutenção e periodicidade das intervenções. Este trabalho apresenta os dados de forma comparativa entre os dados obtidos nos registros de assistência técnica do fabricante e os dados obtidos no universo de máquinas acompanhado, objetivando explicitar os resultados das ações de manutenção adotadas.

Os resultados explicitados originam-se nos cálculos dos índices de confiabilidade, realizados a partir dos dados coletados ao longo do tempo, durante o período analisado. As fórmulas e modelos matemáticos empregados baseiam-se em normas internacionais e também em autores diversos, todos referenciados no trabalho.

A análise e a interpretação dos resultados obtidos foram desenvolvidas sob uma óptica de gestão, englobando diversos aspectos gerenciais. Apesar da forte carga gerencial, aspectos técnicos também são abordados neste processo de análise e interpretação dos dados.

1.3. ORGANIZAÇÃO DO TRABALHO

O trabalho está organizado em 3 grandes blocos, sendo o primeiro bloco, a partir do Capítulo 2, uma revisão bibliográfica sobre a função manutenção, sua evolução, políticas, ferramentas e custos envolvidos, onde se busca definir conceitos relacionados à utilização das diversas políticas de manutenção e discutir os custos de cada política, de forma comparativa. Traz, portanto, o embasamento teórico necessário para o conhecimento das diversas políticas de manutenção, suas vantagens e desvantagens, possibilitando uma correta escolha da melhor política para cada equipamento, dentro de sua realidade operacional.

O segundo bloco compreende o Capitulo 3 e consiste na revisão bibliográfica de conceitos de confiabilidade e sua aplicação na manutenção. Também são apresentados tópicos referentes a gestão de falhas, tais como conceitos, tipos e modos de falha. Neste mesmo bloco, são apresentados, ainda, os conceitos da RCM – Manutenção Centrada em Confiabilidade, ferramenta que auxilia na escolha da melhor política de manutenção a partir de uma análise de confiabilidade de cada equipamento. Este bloco, portanto, objetiva apresentar o estudo de confiabilidade como ferramenta na tomada de decisão para a escolha adequada da melhor política de manutenção para cada equipamento.

O terceiro bloco, Capítulo 4, apresenta o estudo de caso do uso de dados de confiabilidade de máquinas - ferramenta CNC na escolha da política de manutenção para um conjunto de novos equipamentos. O bloco traz, portanto, a aplicação dos conceitos apresentados nos dois blocos anteriores.

A conclusão do trabalho, sobre a aplicabilidade do estudo de confiabilidade na escolha das políticas de manutenção, é baseada nos dados obtidos no estudo de caso e é apresentada após o terceiro bloco.

2. A FUNÇÃO MANUTENÇÃO

A manutenção de equipamentos de produção surgiu como uma necessidade de reparar os equipamentos que quebravam na linha de produção, assim que a revolução industrial tomou sua forma, no século XVI, com o surgimento dos primeiros teares mecânicos. Baseava-se apenas na correção dos defeitos quando estes efetivamente interrompiam a produção. A princípio, era executada pelos próprios operadores das máquinas, não existindo naquela época, ainda, uma equipe específica de manutenção (VIANA, 2002).

Apenas com o surgimento das primeiras técnicas de planejamento do trabalho, em 1900, e, posteriormente, com a Segunda Guerra Mundial, a visão da função manutenção começou a mudar. Naquele momento, apesar da visão de que a manutenção era uma função marginal, ou seja, estava em segundo plano, mas não se podia prescindir dela em momento algum, a atividade de manutenção se firmou como necessidade absoluta (VIANA, 2002).

Esta idéia de que a manutenção deveria apenas reparar as falhas começou a mudar por volta de 1950, quando surgiu a idéia de se fazer manutenção preventiva. A necessidade de manutenções preventivas surgiu juntamente com a melhoria das máquinas e dos processos, que permitiam maior produção, mas que exigiam maiores cuidados com os equipamentos. Surgiu, também, do

aumento de custos na produção devido às quebras constantes, tanto custos relacionados às peças de reposição, como, principalmente, custos da indisponibilidade do equipamento. A necessidade de manutenções preventivas e os benefícios advindos deste tipo de manutenção começaram a mudar a forma como a manutenção era encarada e começaram a surgir diversas políticas de manutenção, já dentro de uma visão mais gerencial e estratégica (VIANA, 2002).

Prevenir as quebras se tornou uma necessidade dentro da função manutenção. Porém, a manutenção preventiva baseada em frequências pré – definidas de reparos, como começou a ser utilizada, elevava os custos de manutenção, principalmente com peças que acabavam sendo trocadas em intervenções desnecessárias ou, ainda, com as quebras que acabavam ocorrendo antes da intervenção prevista. Objetivando otimizar as ações de prevenção das falhas, surge o conceito de manutenção preditiva. Este tipo de manutenção procura medir determinados parâmetros no equipamento, como ruídos, vibrações, temperaturas, consumos e outros, na tentativa de predizer o momento mais adequado para a intervenção no equipamento. Com a manutenção preditiva, deixa-se de utilizar um plano de manutenção preventiva, baseado em frequências, para se basear nas reais condições da máquina (XENOS, 1998).

Esta nova visão da manutenção como ferramenta capaz de garantir a qualidade e o lucro das operações fez surgir diversos planos e políticas de manutenção. Estes planos objetivavam buscar a melhor relação custo - benefício nas ações de manutenção, de modo a garantir a disponibilidade dos equipamentos de produção, a qualidade dos produtos fabricados e, consequentemente, a competitividade da empresa no mercado, garantindo sua sobrevivência (MURTHY *et al*, 2002) .

Nos próximos tópicos, são apresentados planos, políticas e ferramentas da manutenção, sob a óptica gerencial e estratégica da função manutenção. Antes, porém, serão discutidas questões relacionadas a custos da manutenção e da não - manutenção, também sob uma óptica gerencial e estratégica, buscando balizar o uso de conceitos de confiabilidade como alternativa na

busca da melhor relação custo - benefício das ações de manutenção. As discussões sobre custos da manutenção são apresentadas no âmbito das relações entre manutenção e qualidade, produtividade e disponibilidade.

2.1. CUSTOS DA MANUTENÇÃO E DA NÃO - MANUTENÇÃO

A busca incessante pelo lucro nas empresas, focalizada em uma análise simplista de redução de custos e aumento de produção, pode desviar a empresa do real caminho para sua sobrevivência no mercado. O caminho para se manter e ganhar novos mercados está na qualidade e na produtividade. A busca da qualidade e da produtividade passa por diversas questões, como políticas de gestão da qualidade, análise do melhor sistema de produção, treinamento, manutenção da produção e outros fatores estratégicos. O papel da manutenção mostra-se essencial na garantia da qualidade e da produtividade das empresas.

A manutenção deve ser encarada como uma função estratégica na obtenção dos resultados empresariais da organização e deve estar direcionada para o suporte do gerenciamento e à solução de problemas apresentados na produção, lançando a empresa em patamares competitivos de qualidade e produtividade (PINTO & XAVIER, 2001). Portanto, deve considerar os objetivos da empresa (SOURIS, 1992). Ainda, segundo Souris (1992), a função manutenção deve ser gerida de modo a proporcionar à empresa um grau de funcionalidade com um custo global otimizado.

A relação entre a manutenção e a estratégia organizacional foi apresentada por Wireman (1990), segundo o qual a estratégia de manutenção é definida pela empresa com base nos seus objetivos organizacionais. O mesmo autor coloca a função manutenção como fator determinante do sucesso do planejamento da produção e, portanto, da produtividade do processo. Entretanto, a importância da função manutenção e a opção consciente por um modelo nem sempre são claros e levados em consideração na análise das estratégias das organizações. Mesmo quando o são, acabam sendo descartadas por uma análise incorreta

dos custos envolvidos. O fator custo da manutenção, quando analisado isoladamente, acaba inibindo as empresas a considerá-la em sua estratégia, relegando-a a uma posição secundária.

Nos próximos tópicos, são discutidas as relações entre manutenção e qualidade, produtividade e disponibilidade, dentro de um enfoque de análise de custos, procurando mostrar a necessidade de uma análise de outros custos envolvidos no processo de manutenção, além do custo efetivo das ações de manutenção.

2.1.1. MANUTENÇÃO E QUALIDADE

Quando se fala em produção de peças através de máquinas e equipamentos, com qualquer nível de automação, a qualidade do produto final é determinada, entre outros fatores, pelo desempenho da máquina/equipamento que o produz. Manutenção e qualidade, tradicionalmente, têm sido analisadas separadamente, como identifica Ben-Daya (2001) que, para contrapor esta idéia, apresenta um modelo matemático que leva em consideração a deterioração do equipamento no processamento da produção de lotes econômicos. Badía *et al*. (2002) discutem esta questão relacionando uma manutenção ineficaz com a necessidade de inspeções mais freqüentes, elevando o custo do controle de qualidade.

A deterioração das condições ótimas do equipamento leva a desvios no processo e à queda da qualidade. Conforme Souris (1992), a busca pela qualidade do processo e do produto passa pela qualidade da manutenção, sem a qual o montante investido em sistemas de gestão da qualidade pode ser inteiramente perdido. A qualidade da função manutenção pode evitar a deterioração das funções operacionais dos equipamentos, especialmente aquelas que levam a falhas ocultas, que resultam na incapacidade do processo. Apenas uma manutenção adequada do equipamento pode garantir que o processo não perderá sua capacidade devido a desvios provocados por problemas no mesmo. A manutenção é encarada como essencial também

dentro dos sistemas de gestão da qualidade, como a ISO 9000 (PINTO & XAVIER, 2001).

2.1.2. MANUTENÇÃO E PRODUTIVIDADE

De forma mais clara que a qualidade, a produtividade também depende do desempenho do equipamento. A redução da produtividade em função das paradas de máquinas é discutida no item 2.1.3 deste trabalho, sob a óptica da disponibilidade dos equipamentos de produção. Entretanto, esta produtividade pode ser ainda afetada quando a falta de manutenção ou a manutenção ineficaz causam aumento dos tempos de produção pela redução do desempenho, mesmo não havendo uma parada efetiva do equipamento. Esta condição leva a empresa a buscar a origem da queda de produção em outros fatores como ferramental, materiais e até operadores, elevando os custos operacionais. É o caso, por exemplo, quando o motor do eixo principal de um torno não pode fornecer toda a potência disponível em função de baixa isolação, provocada por sujeira ou umidade (falta de manutenção), e a empresa busca alterações de processo de fabricação que compensem a queda de potência. Pode-se dizer, portanto, que uma política inadequada de manutenção traz custos adicionais relacionados à falta de produtividade, desde custos com horas extras necessárias para cumprir a produção, até perdas de contrato, todas mensuráveis, além de outras perdas não diretamente mensuráveis, como o desgaste da imagem da empresa (PINTO & XAVIER, 2001).

2.1.3. MANUTENÇÃO E DISPONIBILIDADE

A redução do desempenho do equipamento, que traz a redução da qualidade e da produtividade, pode ser evitada com a aplicação de políticas adequadas de manutenção que possam garantir a eficiência do equipamento. A falta destas políticas, além de reduzir a capacidade do processo, traz as paradas efetivas do equipamento, reduzindo a disponibilidade do mesmo. Tal disponibilidade depende da confiabilidade e da manutenabilidade apresentadas pelos

equipamentos (WILLIAMS *et al.*, 1994). A manutenabilidade diz respeito a facilidade de se reparar um equipamento e é, normalmente, apresentada pelo índice *MTTR – Mean Time To Repair,* ou seja especifica o tempo médio para reparo (VIANA, 2002).

Apesar dos valores de confiabilidade e manutenabilidade serem, por definição, fatores intrínsecos do equipamento e dependerem da concepção de seu projeto (SAE INTERNATIONAL, 1992), eles são afetados por outros fatores que independem do projeto, como o treinamento dos manutentores, a disponibilidade de peças e a limpeza/condição geral do equipamento. Uma política adequada de manutenção deve, então, manter a capacidade e a disponibilidade do equipamento, evitando quebras (aumento de confiabilidade) e criando condições de uma intervenção corretiva rápida e eficaz, quando a falha ocorrer (aumento da manutenabilidade).

2.1.4. CUSTOS DA FALTA DE MANUTENÇÃO

O que foi exposto mostra alguns pontos onde a falta de uma política de manutenção gera custos. Segundo Mirshawa & Olmedo (1993), os custos gerados pela função manutenção são apenas a ponta de um "*iceberg*". Esta ponta visível corresponde aos custos com mão-de-obra, ferramentas e instrumentos, material aplicado nos reparos, custo com subcontratação e outros custos referentes à instalação ocupada pela equipe de manutenção. Abaixo desta parte visível do "*iceberg*" estão os maiores custos, invisíveis, que são os custos decorrentes da indisponibilidade do equipamento.

O custo da indisponibilidade concentra-se nos custos decorrentes da perda de produção e da não-qualidade dos produtos, os custos da recomposição da produção e penalidades comerciais com possíveis consequências sobre a imagem da empresa (MIRSHAWA & OLMEDO, 1993). Estes aspectos também foram tratados por Cattini (1992) quando salienta, de forma bastante clara, toda a consequência da falta de manutenção na forma de custos ligados à indisponibilidade e deterioração dos equipamentos como causa da redução da

produtividade. Esta relação entre custo de manutenção, custo da indisponibilidade e produtividade foi estudada em modelo matemático apresentado por Chiu & Huang (1996), cuja conclusão aponta para uma melhor relação custo - benefício quando a manutenção é tratada de forma preventiva do que em situações de descontrole do processo produtivo pela falta de manutenção.

Se é possível, então, concluir que prevenir é melhor do que corrigir, sob o ponto de vista econômico, resta analisar e escolher a melhor política de manutenção a ser adotada para a otimização dos custos. Esta análise pode ser observada em um gráfico clássico, mostrado na Figura 1, que ilustra a relação entre o custo de manutenção e o custo da falha, ou seja, o custo da indisponibilidade.

O gráfico da Figura 1 mostra que investimentos crescentes em manutenção reduzem, em maior proporção, os custos decorrentes das falhas e, como consequência, reduzem o custo total da manutenção. Entretanto, o gráfico mostra, também, que, a partir de certo ponto, os gastos excessivos com manutenção reduzem pouco os custos da indisponibilidade e acabam elevando o custo total. Esta questão também foi estudada por Murty & Naikan (1995), que trabalham os limites da disponibilidade e apresentam um modelo matemático para o cálculo do ponto ótimo de disponibilidade, como mostrado no gráfico da Figura 2.

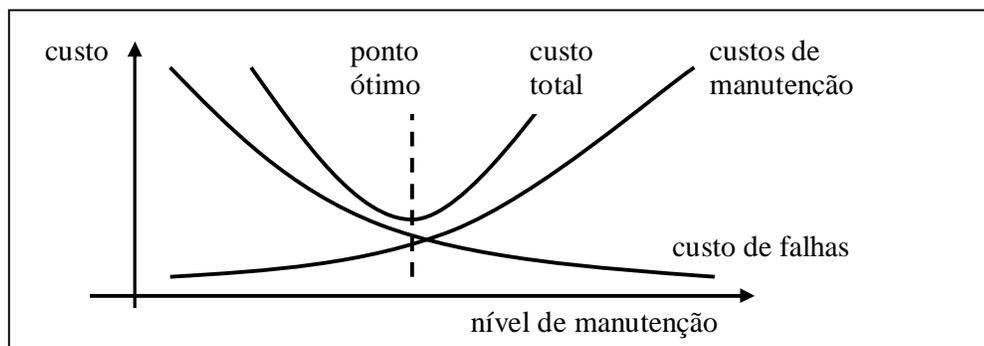



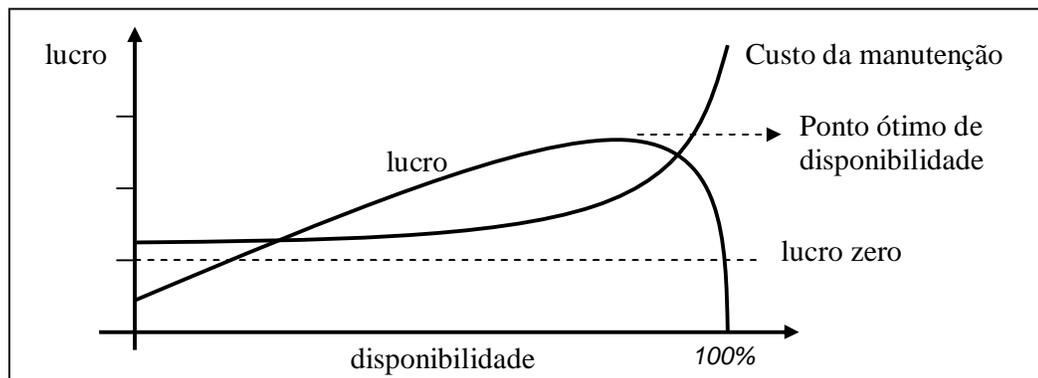
Figura 1 - Gráfico custos x nível de manutenção

Fonte: Murty & Naikan, 1995

Figura 2 - Gráfico lucro x disponibilidade

O gráfico da Figura 2 mostra que a busca por falha zero (100% de disponibilidade) requer gastos muito elevados com manutenção, gerando uma consequente redução do lucro da operação. Encontrar o ponto ótimo de disponibilidade é o grande desafio na gestão da manutenção, como afirma Cabrita (2002), para o qual a manutenção deve garantir a produtividade e o lucro dos negócios da empresa, com o menor investimento possível. É muito importante observar, nesta busca do ponto ótimo, que a política de manutenção a ser adotada deve levar em consideração aspectos como a importância do equipamento para o processo, custo do equipamento e de sua reposição, consequências da falha do equipamento no processo, ritmo de produção e outros fatores. Isso indica que a política de manutenção não pode ser a mesma para todos os equipamentos, mas deve ser diferenciada para cada equipamento na busca do ponto ótimo entre disponibilidade e custo.

Todos os argumentos e citações apresentados tiveram por objetivo mostrar que a função manutenção deve ser encarada como função estratégica dentro da organização, podendo e devendo ser utilizada na redução dos custos totais do processo de produção como investimento, e não como gastos adicionais. A escolha adequada da política de manutenção pode trazer, portanto, uma otimização dos custos. A seguir são apresentadas as políticas e metodologias de manutenção que, se corretamente empregadas, podem proporcionar a otimização desejada.

2.2. MANUTENÇÃO CORRETIVA

Entende-se por manutenção corretiva o reparo do equipamento quando este tem sua função principal inoperante devido a uma falha (WAEYENBERGH, *et al.*, 2000). Em outras palavras, constitui o restabelecimento de uma falha que impede o funcionamento do equipamento, portanto de caráter puramente corretivo.

Embora esse procedimento possa parecer ausência de uma política de manutenção, a manutenção corretiva é uma alternativa que, aparentemente, coloca-se no extremo esquerdo inferior do gráfico da Figura 1. O problema desta política não está nas intervenções corretivas, mesmo porque, em alguns casos, esta é realmente a melhor alternativa. O problema é que a aplicação isolada desta política requer enormes estoques de peças para suportar as sucessivas quebras, tornando o trabalho imprevisível e, portanto, sem um plano capaz de equacionar os custos (PINTO & XAVIER, 2001).

Entretanto, levando-se em consideração a importância do equipamento no processo, seu custo e as consequências da falha, pode-se chegar à conclusão que qualquer outra opção, que não a corretiva, pode significar custos excessivos. Em outras palavras, a opção pela manutenção corretiva é a melhor quando os custos da indisponibilidade são menores que os custos necessários para evitá-la, como em equipamentos baratos, formados por peças baratas e descartáveis, de substituição muita rápida e pouca influência no processo produtivo. Esta análise é feita do ponto de vista gerencial e estratégico. Por exemplo, planejar e executar manutenção preventiva de uma furadeira de bancada, entre outras existentes na área de ferramentaria, pode estar tirando recursos importantes que podem ser aplicados em equipamentos mais importantes.

Outra visão importante da manutenção corretiva é a lição trazida pela falha. A falha não deve ser encarada apenas como “um incêndio a ser apagado”, mas como “um incêndio a ser também investigado”. Mais importante que o reparo é

conhecer o modo da falha, suas razões, causas e consequências para que uma ação preventiva possa ser tomada neste e nos demais equipamentos similares. Registrar ordenadamente todas as informações referentes às ações corretivas também deve fazer parte deste processo de aprendizagem. Aprender com a falha é também uma decisão gerencial. A manutenção, como estrutura organizacional, precisa criar mecanismos que previnam as falhas, conseguindo registrar e aprender com as mesmas, evitando que estas se repitam (FARIA, 1994).

Do ponto de vista estratégico, as informações referentes a uma falha e sua correção devem ser tratadas como capital da empresa. O conjunto destas informações, quando devidamente organizadas, pode proporcionar à empresa subsídios importantes na tomada de decisões acerca da política de manutenção a ser adotada, frequência de intervenções, definição de estoque de peças de reposição, etc. Em resumo, a correção de uma falha deve ser encarada como uma oportunidade de enriquecer o conhecimento da empresa, de modo a direcionar suas ações para a prevenção. E mesmo que uma nova falha venha a ocorrer, os dados anteriores devem proporcionar à equipe de manutenção a possibilidade de reparar a falha de uma forma mais rápida e eficaz.

2.3. MANUTENÇÃO PREVENTIVA

Entende-se por manutenção preventiva uma ação ou conjunto de ações que visem prevenir a falha, ou seja, é um política de prevenção à falha com ações que impeçam a sua ocorrência. Para Pinto & Xavier (2001), a manutenção preventiva é a atuação realizada de forma a reduzir ou evitar a falha ou queda no desempenho, obedecendo a um plano previamente elaborado, baseado em intervalos definidos de tempo.

Os planos de manutenção preventiva caracterizam-se por utilizar intervenções e substituição de peças de forma periódica, cuja frequência baseia-se, unicamente, em tempos pré - definidos, normalmente indicados pelo fabricante

do equipamento, sem importar-se com o estado real destas peças, o que muitas vezes leva ao desperdício de peças e mão-de-obra. Discutindo esta questão, Saranga (2002) comenta um caso de 1990 no setor elétrico, onde um terço do dinheiro gasto em manutenção preventiva havia sido perdido em ações desnecessárias.

Normalmente, esta política é corretamente aplicada em itens de desgaste como rolamentos, gaxetas, anéis de vedação e outros. Entretanto, é comum encontrar a aplicação errônea desta política também em itens que não sofrem desgaste, o que mostra o desconhecimento e despreparo de muitas equipes de manutenção em diversas empresas. A manutenção preventiva apenas se justifica em itens que sofrem desgaste e/ou deterioração pelo tempo de uso. Mesmo nestes casos, seu uso deve ser muito bem analisado, devido à imprevisibilidade do desgaste, ou seja, o ritmo de desgaste pode não ser uniforme por estar sujeito a muitas variáveis. Esta imprevisibilidade ainda requer estoques altos de peças de reposição, elevando os custos relativos. Dohi *et al*. (2001) abordam a questão do custo do estoque e apresentam um modelo matemático para otimizar o estoque em aplicações de manutenção preventiva baseado no índice de confiabilidade dos equipamentos. Além do problema do estoque elevado para cobrir a imprevisibilidade das falhas, a manutenção preventiva apresenta o inconveniente de intervenções muitas vezes desnecessárias, que reduzem a produtividade, elevam os custos totais e, ainda, podem introduzir defeitos não existentes antes da intervenção (PINTO & XAVIER, 2001). Um exemplo clássico é trocar rolamentos de eixos engrenados ainda em bom estado e introduzir folgas axiais por falta de apertos adequados no sistema de pré-carga.

É importante que o plano de manutenção não utilize como base para a freqüência das intervenções apenas o tempo de uso, mas que se analisem variáveis que possam estar mais estreitamente ligadas ao desgaste de cada item. Por exemplo, duas máquinas equivalentes podem não ter as mesmas frequências para as intervenções se forem submetidas a cargas distintas. Da mesma forma, duas máquinas idênticas que trabalham em ambientes

diferentes não devem ter seu filtro de ar substituído com a mesma frequência se cada ambiente satura o filtro em tempos diferentes. Se a análise das variáveis envolvidas não for levada em consideração, corre-se o risco de se ter um plano de manutenção preventiva inadequado, quer seja subdimensionado ou superdimensionado. De qualquer forma, um plano inadequado trará aumentos de custo desnecessários (SARANGA, 2002).

Outra forma que possibilita o refinamento das bases de frequência de intervenções é a análise do estado de cada item substituído. Se percebido que o item tem muito mais vida útil restante, deve-se analisar a possibilidade de reduzir a frequência com que ele será trocado dentro de um mesmo padrão de uso. Da mesma forma, se uma falha ocorre antes da substituição ou percebe-se que o item substituído já não está cumprindo plenamente sua função, deve-se analisar a possibilidade de aumentar a frequência com que este item deve ser substituído. Cavalcante *et al.* (2003) sugerem um Sistema de Apoio à Decisão – SAD e modelos matemáticos para a definição da frequência para substituição de peças, levando-se em conta dados de confiabilidade destas peças e seus custos.

Sob o ponto de vista gerencial, uma política de manutenção que possa prevenir a falha é muito bem vinda. O aspecto da previsibilidade das paradas para manutenção tem um papel muito importante na tranquilidade que o setor de produção desfruta para desenvolver seu trabalho. Como as manutenções preventivas podem ser agendadas com antecedência e, em muitos casos, podem ser realizadas nos finais de semana ou outros momentos onde não há produção, esta política ganha muitos adeptos, principalmente entre os envolvidos com a produção e, principalmente, quando produção e manutenção não estão sob a mesma gerência. É uma política que pacifica as relações entre as gerências de ambas as áreas, mas que pode trazer custos elevados para a empresa, especialmente com peças. As empresas devem analisar os custos globais desta política de manutenção preventiva de forma cuidadosa, uma vez que os custos finais podem ser muito elevados, mesmo com a redução nos custos provocados por quebras.

Kardec & Lafraia (2002) discutem esta questão dos custos finais na busca de aumento de disponibilidade operacional, mostrando que deve haver uma análise criteriosa sobre as ações de manutenção, de modo a buscar o ponto ótimo de gastos com manutenção para obter os melhores resultados, com o menor custo.

Esta previsibilidade das ações preventivas também traz como benefício a possibilidade de manter estoques bastante reduzidos de peças sobressalentes ou mesmo eliminar o estoque (WAEYENBERGH *et al.*, 2000). Como as intervenções são agendadas, as peças necessárias a cada intervenção podem ser adquiridas às vésperas do trabalho, o que possibilita reduzir os custos com itens imobilizados. Deve-se, entretanto, ponderar o custo global desta política sob a óptica de uma relação custo - benefício. Novamente, cabe lembrar, aqui, a necessidade de se definir um plano de manutenção preventiva para cada equipamento levando em consideração sua importância no processo produtivo.

2.4. MANUTENÇÃO PREDITIVA

Para Kardec *et al*. (2002), manutenção preditiva é qualquer atividade de monitoramento que seja capaz de fornecer dados suficientes para uma análise de tendências, emissão de diagnóstico e tomada de decisão. Trata-se de monitorar um determinado equipamento, através de inspeções e medições de variáveis, até que sejam atingidos determinados limites de deterioração que definam ações para evitar a falha (XENOS, 1998). Para Dhillon (2002), a manutenção preditiva caracteriza-se por utilizar modernos métodos de medição e processamento de sinais para diagnosticar, com precisão, a condição de um item/equipamento durante sua operação.

Este tipo de manutenção é também conhecida como “CBM – *Condition - Based Maintenance*” ou Manutenção Baseada em Condições; portanto, coloca-se como uma alternativa à manutenção preventiva clássica, baseada em tempo (“TBM – *Time - Based Maintenance*”). Esta diferenciação entre preventiva e

preditiva, ou baseada em tempo e baseada em condições, é explicitada por Saranga (2002).

A manutenção preditiva procura resolver o impasse da relação custo – benefício, muito frequentemente encontrado na política de manutenção preventiva discutida. Segundo Saranga (2002), a manutenção preditiva pode aumentar a confiabilidade do equipamento e reduzir os custos quando comparada com as práticas preventivas, uma vez que ela evita que os itens do equipamento sejam substituídos sem necessidade com alguma vida útil. Além disso, as ações preditivas que, basicamente, se constituem de medições podem ser executadas normalmente com a máquina em operação. Portanto, as ações preditivas requerem menor tempo de máquina parada que as ações preventivas, as quais necessitam ser realizadas com máquina parada, pois pressupõem intervenções efetivas nos equipamentos.

Na política preditiva, não há um plano rígido de substituição de itens baseado em uma frequência de intervenção pré - definida. Ao contrário, a manutenção preditiva prevê medições periódicas de determinadas variáveis que possam indicar o estado real do item, sem que este tenha que ser retirado da máquina. A frequência das medições periódicas também não é rígida, mas segue um padrão segundo as respostas obtidas através das medições. A partir do momento que uma determinada variável passe a indicar a degradação de um item, o tempo entre uma medição e outra é reduzido. Pela característica da deterioração, pode-se prever, através das medições, o melhor momento para a substituição, que pode ser agendada previamente. Além disso é possível definir também o melhor momento para adquirir o item a ser substituído, evitando tê-lo em estoque (PINTO & XAVIER, 2001).

Xenos (1998) aborda a manutenção preditiva sob o ponto de vista da mão-de-obra necessária para executá-la, condenando a idéia de que estas ações preditivas devam ser concentradas em uma equipe específica e mais qualificada. Para o autor, mesmo os operadores devem participar das ações preditivas, devendo ser treinados para tal.

A complexidade e os custos dos aparelhos de medição e a qualificação da mão-de-obra para utilizá-los pode significar uma dificuldade na implantação da manutenção preditiva. Para muitas empresas, o investimento não é compensador se analisada a quantidade de máquinas que poderiam ser colocadas sob esta política. Para estes e outros casos, a empresa pode optar pela contratação dos serviços de medição e análise, deixando para sua equipe apenas a intervenção propriamente dita. Estas questões referentes aos custos da manutenção preditiva são discutidas por Kardec *et al.* (2002) de forma comparativa com os tipos de manutenção preventiva e corretiva, concluindo que os custos finais utilizando-se apenas ações corretivas é, pelo menos, o dobro dos custos finais quando se emprega uma política preditiva.

De qualquer forma, o emprego de políticas preditivas pode trazer enormes benefícios à produção, que passa a ter seus equipamentos sendo monitorados frequentemente. Com isso, percebe-se uma redução no número de paradas para intervenções preventivas e tem seus custos de manutenção reduzidos. É importante observar que estas políticas não são antagônicas, mas complementares (XENOS, 1998). Uma boa análise dos equipamentos, sua importância, confiabilidade e o custo de suas paradas deve definir como as duas políticas devem ser utilizadas, que grau de manutenção preditiva deve ser empregado em cada equipamento e que trabalho preventivo deve ser efetuado.

O grau de manutenção preditiva utilizado em um equipamento deve condizer com a importância e com a possibilidade de medição de cada variável. Deve-se utilizar o método onde realmente é possível fazer medições significativas. Com esta análise, pode-se reduzir o custo das medições, especialmente quando esta tarefa é terceirizada, evitando-se medir pontos que nada significam para a análise das condições dos itens (XENOS, 1998).

2.5. MANUTENÇÃO DETECTIVA

A manutenção detectiva, segundo Pinto & Xavier (2001), começou a surgir na literatura a partir da década de 90. A manutenção detectiva caracteriza-se pela

preocupação com as falhas ocultas, ou seja, as falhas que não se tornam evidentes aos operadores (SOUZA & LIMA, 2003).

Badía *et al.* (2002) definem as falhas ocultas como sendo aquelas que permanecem encobertas até que alguma inspeção ou teste seja feito ou, ainda, quando a função deteriorada é exigida. Segundo os autores, estas falhas podem se manifestar em equipamentos parados, unidades reservas e em equipamentos de segurança que raramente são utilizados. Os autores apresentam, ainda, modelos matemáticos para definir a frequência ótima de inspeção destes sistemas.

A manutenção detectiva tem a função de identificar estas falhas ocultas, especialmente em equipamentos de segurança, através de inspeções e testes periódicos, evitando que sejam percebidas apenas quando se descobre que o ítem de segurança não atuou. São exemplos deste tipo de equipamento, as bóias de nível, sensores de sobretemperatura e sobrecarga, entre outros, nos quais a falha pode permanecer oculta até que sua função seja exigida.

Para Pinto & Xavier (2001), a manutenção detectiva deve buscar a identificação das falhas ocultas dos sistemas de proteção sob dois aspectos: não-atuação e atuação indevida. Os autores sugerem os SDCD – Sistemas Digitais de Controle Distribuído como uma tecnologia de supervisão capaz de identificar estas falhas ocultas. Para os autores, a identificação de falhas ocultas é primordial para garantir a confiabilidade de equipamentos e, especialmente, de sistemas complexos de controle de manufatura.

2.6. MANUTENÇÃO AUTÔNOMA

Pode-se entender por manutenção autônoma aquela realizada pelos próprios operadores. Constitui-se em uma ferramenta muito eficaz de manutenção preventiva e preditiva, a um custo mais baixo que o apresentado por outras técnicas. Autores diversos apresentam a manutenção autônoma em níveis bastante distintos de participação do operador na manutenção do equipamento.

A literatura apresenta desde processos profundos de transformação de operadores de máquinas em um homem de manutenção, na busca de uma maior integração entre manutenção e produção, como apresentam Oliveira & Lima (2002), até processos mais simples de envolvimento do operador em atividades apenas preventivas, como completar níveis de óleo, drenar e/ou substituir filtros, verificar e ajustar pressões hidráulicas e pneumáticas e, principalmente, manter a máquina limpa.

Ações corretivas simples também podem ser acrescentadas às atividades dos operadores, como substituir um cilindro de fixação de uma peça, substituir um botão danificado, uma mangueira rompida, e ajustar a posição de uma porta de acesso. Muitas destas atividades não requerem conhecimento técnico específico e os operadores podem ser facilmente treinados, à medida que as primeiras ocorrências surgem, pelos próprios manutentores, durante a execução do trabalho de reparo (TAKAHASHI & OSADA, 1993).

Muitos críticos da manutenção autônoma alegam ser complicado deixar estas tarefas corretivas e mesmo preventivas para operadores por diversos motivos. O maior deles talvez seja a questão da equiparação salarial e da resistência dos sindicatos, principalmente devido à polivalência e multiespecificação pregada por esta política. Pinto & Xavier (2001) abordam a questão sindical dentro de um enfoque sobre a relação empresa - sindicato. Segundo os autores, as mudanças funcionais provocadas pela política de manutenção autônoma apenas será aceita quando permite ganhos para ambos os lados (empresa e trabalhador). Esta relação "ganha x ganha" deve mostrar a todos os envolvidos os benefícios que o aumento de produtividade e qualidade pode trazer para ambos os lados.

Outra resistência a esta política vem dos próprios gerentes de produção, que alegam que o operador perde muito tempo se tiver que efetuar todas as ações preventivas. Ao contrário do que se pensa, a máquina não precisa estar necessariamente parada para que o operador verifique e complete o nível de óleo lubrificante, drene secadores de ar e realize outras atividades preventivas. É exatamente com a máquina ligada que o operador pode exercer sua função

preditiva, apontando possíveis alterações no consumo de óleo, níveis de ruído e temperatura anormais (XENOS, 1998).

Estas possíveis perdas de produção são contestadas por Takahashi & Osada (1993), que apresentam a manutenção autônoma como uma forma de reduzir os custos com pessoal de manutenção e aumentar a vida útil do equipamento, concentrando-se, basicamente, em limpeza, lubrificação, reapertos e inspeção diária. Hartmann (1992) também cita a redução de custos, redução de falhas e melhora do equipamento como os principais benefícios da manutenção autônoma, enfatizando que a redução de custo é reflexo da eliminação de pequenas paradas e do tempo de reparo devido ao envolvimento constante do operador.

A questão do envolvimento do operador é essencial nesta política. O operador precisa sentir-se motivado a realizar as operações de manutenção. Nenhum plano deste tipo pode dar certo sem a motivação constante dos operadores. Em função disto, o gerenciamento desta política deve ser feito de modo a permitir o crescimento constante dos operadores através de treinamentos e promoções que os diferencie dos demais operadores (PINTO & XAVIER, 2001).

2.7. PROGRAMA 5S

Esta é uma das mais poderosas ferramentas de apoio à manutenção, sendo essencial na obtenção de condições mais favoráveis à aplicação de metodologias de manutenção mais avançadas, como o TPM – *Total Productive Maintenance* (Manutenção Produtiva Total) e o RCM – *Reliability-Centred Maintenance (Manutenção Centrada em Confiabilidade)*, constituindo-se na base para o desenvolvimento do Sistema de Qualidade (PINTO & XAVIER, 2001).

O 5S é o início de um processo de mudança de postura diante da função manutenção. É um programa capaz de baixar os custos da manutenção e da

indisponibilidade, consistindo em ferramenta preventiva, como explica Osada (1992). O autor refere-se ao 5S como uma ferramenta capaz de evitar falhas provocadas pela sujeira acumulada, que impede o funcionamento correto dos equipamentos, e pela desorganização, que impede a visualização das condições reais dos equipamentos.

O 5S vem das iniciais das 5 palavras japonesas *“seiri”, “seiton”, “seiso”, “seiketsu” e “shitsuke”*, que correspondem aos cinco processos de transformação capazes de elevar a eficiência de uma fábrica a um nível de primeira classe (HIRANO, 1994). Estes processos são, respectivamente, a liberação da área (eliminação de itens desnecessários), organização, limpeza, padronização e disciplina. Estes processos, apesar de se aplicarem a toda a organização, têm aplicação direta no chão-de-fábrica e na melhoria das condições de operação e manutenção das máquinas, trazendo grande redução de custos com a diminuição do desperdício e das falhas provocadas por excesso de sujeira (OSADA, 1992).

Para Ashok & Santhakumar (2002), um programa 5S leva os funcionários a ampliar seu foco de visão, tirando-os de uma forma de trabalho extremamente focada para a realização pura e simples da operação e colocando-os em atenção para observar seu ambiente e a correlação deste com os demais. Leva-os a pensar em cinco diferentes direções de uma forma mais crítica e consciente sobre seu trabalho e, principalmente, sobre seu ambiente de trabalho, levando-os a esforços conscientes de melhoria.

O programa 5S é de fácil aplicação, porém requer perseverança em seu gerenciamento. Ashok & Santhakumar (2002) sugerem e apresentam um estudo de caso do uso de “NLP – *Neuro Linguistic Programming”* ou Programação Neuro Linguística para buscar maior adesão dos funcionários em programas de qualidade como o 5S. Não basta fazer um mutirão de limpeza na fábrica; é necessário um acompanhamento constante dos cinco itens em todas as áreas envolvidas. O mais comum é a utilização de quadros demonstrativos que resumem como cada área está sendo vista pela gerência, dando conceitos de avaliação para cada item dos 5S. Estes quadros devem ser bem visíveis e

os trabalhadores de cada área devem conhecer as razões que resultaram naquela avaliação.

O 5S é tido por Bamber *et al.* (2000) como um programa de apoio ao TPM, que será explicitado no próximo item. Para os autores, um programa de 5S bem conduzido deve preceder a implantação do TPM, e deve continuar a ser aplicado conjuntamente na busca de melhores resultados de produtividade e qualidade, com redução de custos e aumento da segurança no local de trabalho.

Aqui, também, existe a necessidade de se motivar os funcionários a manter seu ambiente de trabalho, ferramentas e máquinas sempre limpas e em perfeitas condições de uso. É necessário esclarecer a cada um as razões e os benefícios oriundos de cada item, tanto para o operador, quanto para as máquinas. Cada funcionário deve sentir-se como um componente ativo de seu ambiente de trabalho para que possa influenciá-lo positivamente na obtenção de boas avaliações dentro do programa (OSADA, 1992).

2.8. TPM – *TOTAL PRODUCTIVE MAINTENANCE*

TPM -*Total Productive Maintenance* ou Manutenção Produtiva Total, mais que uma metodologia de manutenção, é uma filosofia de trabalho, tida como missão da empresa na manutenção da produtividade (FLEMING & FRANÇA, 1997). Segundo Takahashi & Osada (1993), o TPM está baseado em 6 pilares:

- 5S e manutenção autônoma: já discutidos, têm como meta criar um ambiente de trabalho disciplinado e condições básicas para os demais pilares.

- Desenvolvimento de recursos humanos: prevê desenvolver aptidões múltiplas nos operários, de modo que possam obter um conhecimento geral de todo o processo de manufatura.

- Manutenção especializada (ou planejada): visa melhorar o planejamento e gerenciamento da manutenção, aperfeiçoando os métodos e tecnologias de prevenção a falha.
- Manutenção da qualidade: objetiva eliminar as ocorrências crônicas de defeitos e disseminar a idéia de qualidade assegurada.
- Melhorias na eficiência da produção e melhorias individuais: prevê a identificação de perdas, avaliação da eficiência e elevação do nível de avanços tecnológicos.
- Tecnologias do equipamento: visa implantar a manutenção produtiva e controles do custo do ciclo de vida dos equipamentos.

Pode-se perceber que outras ferramentas, já apresentadas aqui, também fazem parte da sustentação do TPM. Portanto, TPM não conflita com outras ferramentas, mas as reúne em torno de uma filosofia da manutenção da produtividade. Fleming & França (1997) discutem o uso da RCM *(Reliability-Centred Maintenance ou Manutenção Centrada em Confiabilidade)* como ferramenta na construção do pilar “manutenção planejada”, além de salientar a redução dos custos de manutenção na aplicação do TPM, à medida que permite reduzir perdas e coloca o equipamento em condições ótimas de operação em um processo de alta disponibilidade.

O uso do TPM como ferramenta de gestão da produção é citado por diversos autores, como Bamber *et al*. (2000), que enfatizam o uso de TPM como um sistema de melhoria contínua e eliminação de desperdícios. Para os autores, o TPM é um alicerce importante na implementação de programas de qualidade, como o ISO 9000, e programas de proteção do meio ambiente. O autor cita o TPM, ainda, como uma ferramenta importante na obtenção de uma produção de classe mundial ou “*World Class Manufacturing – WCM*”, capaz de proporcionar melhorias na produtividade e qualidade, redução de custos e prazos de entrega e, ainda, melhoria na segurança e no moral dos funcionários.

Esta visão gerencial do TPM também é apresentada por Cooke (2000), para quem o TPM é a fusão da manutenção com a produção, de modo que ambos possam buscar, juntos, condições de melhoria contínua. Para o autor, o TPM necessita e promove a interação de toda a companhia, exigindo um inter-relacionamento entre os diversos departamentos, através de equipes de trabalho multidisciplinares, dando uma ênfase muito forte na melhoria contínua e na otimização de todo o sistema de produção.

A implementação de um programa de TPM pode apresentar algumas dificuldades e mesmo barreiras organizacionais. Cooke (2000) apresentou um estudo com entrevistas de diversos operadores e manutentores de cinco empresas inglesas, e estudou estas dificuldades. Entre as maiores barreiras organizacionais, estão a questão sindical, a relutância dos operadores e manutentores e a falta de apoio da média e alta gerência. A questão sindical e a relutância dos funcionários são tratada pelo autor de forma conjunta, sugerindo que a solução do impasse está na conscientização dos funcionários e do sindicato a respeito das melhorias nas condições de trabalho e na qualificação dos funcionários. Quanto à falta de apoio, o autor sugere um alinhamento entre as iniciativas gerenciais e as metas organizacionais na busca de entendimento e cooperação entre os departamentos de manutenção e produção.

Para Ferrari *et al*. (2002), o TPM pode melhorar a base tecnológica de uma empresa, à medida que força o aprimoramento dos meios de produção e da tecnologia neles empregada e força o aprimoramento do conhecimento tecnológico de seus funcionários. Portanto, ainda segundo estes autores, o TPM ajuda a melhorar a capacidade da empresa em buscar soluções para os problemas que se apresentam, através da cooperação e da inter-relação entre os diversos departamentos na forma de times de trabalho multifuncionais. Os autores também citam dificuldades na implantação do TPM em empresas italianas e sugerem uma metodologia passo a passo para sua implantação, procurando reduzir os impactos que as novas idéias podem causar em empresas mais tradicionais.

A respeito da implementação do TPM, Hanson *et al*. (2003) elaboraram um trabalho onde analisaram como se deu a implementação de TPM em diversas empresas suecas. Os autores ressaltam que o processo de implantação do TPM deve ser conduzido segundo a realidade cultural e organizacional de cada empresa. Entretanto, afirmam também que esta implantação implica em mudanças organizacionais e que todos dentro da organização, desde a alta gerência até o chão de fábrica, devem estar cientes do que o programa consiste e que benefícios pode trazer à organização e a cada um em particular. Os autores enfatizam a necessidade de focalizar alguns aspectos importantes durante a implementação como liderança e suporte, estratégia, treinamento, monitoramento e avaliação e informação e comunicação, sem os quais a implementação pode não ser bem sucedida.

Este Capítulo 2 mostrou uma gama de políticas e metodologias de manutenção que está a disposição dos planejadores de manutenção. O Capítulo 3, a seguir, mostra os conceitos de confiabilidade e seu emprego como ferramenta para a escolha das políticas de manutenção apresentadas.

3. CONFIABILIDADE

A norma DIN 40041 define confiabilidade como a capacidade de uma unidade sob observação satisfazer as exigências necessárias para a finalidade de uso, nos limites preestabelecidos, que foram especificados para manter suas propriedades por um período determinado (MÜLLER & SCHWARZ, 1987). Já a norma MIL-HDBK-338B, define confiabilidade como a probabilidade de que uma máquina ou equipamento execute sua função de forma contínua, sem falhas, por um período de tempo determinado, e sob condições normais de utilização.

Para a SAE International (1992), confiabilidade é a probabilidade que uma máquina/equipamento possa trabalhar continuamente, sem falha, por um intervalo específico de tempo, quando operando sob condições definidas. Ainda segundo a SAE International, confiabilidade e manutenabilidade são alvos de um plano de ações chamado R&M *Plan* (Plano Confiabilidade & Manutenabilidade), acordado entre o cliente e o fabricante da máquina/equipamento para o fornecimento de produtos com forte preocupação em confiabilidade, desde a concepção do projeto, até o descarte, tratando o equipamento em todo seu ciclo de vida.

Ragazzi (2001) aborda o conceito intuitivo de confiabilidade, percebido pelas pessoas em geral, como a característica de um produto ser confiável, ou, em outras palavras, de oferecer durabilidade e funcionalidade. Também destaca a expectativa do cliente quanto à função do produto quando conceitua confiabilidade como a probabilidade de um produto desempenhar sua função durante um tempo de vida especificado, sob condições de operação específicas, de modo a atingir ou exceder as expectativas dos clientes.

Para Düpow & Blount (1997), um produto confiável deve prover segurança em termos de funcionalidade, deve durar o suficiente para ser amortizado e deve ser capaz de satisfazer o cliente. Esta visão está mais voltada para a

preocupação com o custo - benefício representado pela confiabilidade do equipamento adquirido.

Um foco mais voltado à face estatística da confiabilidade é dado por Lafraia (2001), quando enfatiza a previsibilidade da falha como resultante da definição da confiabilidade de um produto. O enfoque do autor está na base matemática que sustenta os conceitos de confiabilidade.

Outras definições são apresentadas por autores que defendem o uso do RCM - *Reliability-Centred Maintenance* como uma ferramenta para gerenciamento da manutenção. Nesta linha, Smith (1993) define confiabilidade como a probabilidade que um dispositivo irá desempenhar uma função específica de forma satisfatória por um período de tempo específico e sob condições definidas. Observa-se na definição apresentada a ausência do termo falha, concentrando-se no desempenho satisfatório da função como fator determinante da confiabilidade. Esta mesma definição e foco são apresentados também por Castro (1997) em seu trabalho sobre a aplicação de confiabilidade nas empresas Brasileiras. Pinto & Xavier (2001) usam, também, a mesma definição quando apresentam a manutenção como função estratégica dentro de uma organização.

Para Moubray (2000), confiabilidade não é uma função em si, mas uma expectativa de desempenho que considera todas as funções envolvidas. Em sua discussão sobre as formas de medir a eficácia da manutenção, o autor apresenta a pergunta: "com qual freqüência ele falha?", como um conceito que talvez seja o mais bem compreendido para o termo confiabilidade.

Apesar dos diferentes conceitos de confiabilidade, todos os autores citados mostram as mesmas linhas gerais para as definições matemáticas de confiabilidade. Matematicamente, apresentam a confiabilidade sob duas formas. A primeira é quanto ao tempo médio entre falhas ou MTBF – *Mean Time Between Failures*. Segundo Lafraia (2001), o MTBF fornece a expectativa média de vida dos itens e pode ser definido como a média dos

tempos de vida tomados de uma quantidade de n elementos, como expresso na Equação 1.

$$MTBF = \sum_{i-1}^{n} ti \Big/ n \qquad [1]$$

onde *ti* é o i-ésimo elemento de uma amostra de n elementos.

Outra forma de apresentar o índice de confiabilidade é pela probabilidade de falha ou função confiabilidade *R(t),* onde *"t"* equivale ao tempo considerado para definir o índice de confiabilidade *(R),* ou seja, define-se a probabilidade de um equipamento sobreviver (não falhar) dentro do período *"t",* como pode ser visto na Equação 2.

$$R(t) = \int_{t}^{\infty} f(t)dt \qquad [2]$$

onde *R(t)* é a confiabilidade de sobrevivência de um item até o tempo especificado pela variável de tempo *t, e f(t)* é a função densidade de probabilidade (CASTRO, 1997).

Portanto, a matemática envolvida para o cálculo deste índice depende, basicamente, da função densidade de probabilidade que corresponde a modelos de distribuição das falhas, como a distribuição normal, lognormal, exponencial, *Weibull* e outras. Toda a matemática aplicada no cálculo de confiabilidade para estas distribuições e outros conceitos matemáticos podem ser obtidos em Marcorin (2002), Lafraia (2001), Ragazzi (2001) e Piazza (2000).

Para mostrar a aplicabilidade dos conceitos de confiabilidade, serão comentadas, a seguir, as literaturas que abordam a aplicação desses conceitos nas diversas áreas da engenharia como mecânica, eletrônica, naval, aeronáutica e outras. Pode-se perceber que estes conceitos são aplicados desde a concepção de um projeto novo, até o suporte pós-venda, passando

pelo processo de produção, encarados como ferramentas de um processo de melhoria contínua.

De forma mais intensa, serão também comentadas as literaturas resgatadas que abordam o uso dos conceitos de confiabilidade especificamente no gerenciamento da manutenção, procurando mostrar a aplicabilidade destes conceitos nesta área. Neste contexto, as literaturas resgatadas apresentam aspectos muito variados, desde modelos matemáticos para cálculo de confiabilidade de sistemas específicos, até discussões da aplicação de RCM – *Reliability-Centred Maintenance* ou Manutenção Centrada em Confiabilidade, passando por análises de custo de manutenção baseadas em confiabilidade, ferramentas de apoio à aplicação da confiabilidade na manutenção e outros aspectos.

Antes de mostrar a aplicação dos conceitos de confiabilidade serão discutidos aspectos referentes as falhas e o gerenciamento destas falhas pela função manutenção. Neste item serão abordados os tipos de falhas e sua relação com as políticas de manutenção disponíveis para trata-las.

3.1. GESTÃO DE FALHAS

A NBR 5462 de 1994 conceitua falha como o término da capacidade de um item desempenhar sua função (VIANA, 2002). Moubray (2000) salienta a expectativa do usuário quando define falha como a incapacidade de qualquer ativo de fazer o que seu usuário quer que ele faça. A expectativa dos diversos usuários de um equipamento também é fator predominante na definição de falha para Kardec & Lafraia (2002), para os quais um equipamento pode estar em estado de falha, sob o ponto de vista do setor de segurança, em função de algum vazamento de óleo, enquanto o setor de produção não considera que o equipamento falhou nestas mesmas condições.

É, portanto, importante definir a função, ou funções, de cada equipamento e o padrão de desempenho aceitável, para que a definição do estado de falha

esteja baseada na função e não no equipamento. É o que Moubray (2000) chama de falha funcional, ou seja quando o equipamento não cumpre com sua função dentro de um padrão aceitável de desempenho. Moubray ainda cita a importância de analisar falhas funcionais para a definição dos modos de falha, ou seja, os eventos que podem levar a função a falhar.

Segundo Piazza (2000), as falhas que ocorrem em equipamentos e sistemas podem ser classificadas, basicamente, em 3 tipos: prematuras, casuais e por desgaste. Cada uma delas apresenta características distintas e portanto requerem uma análise apropriada para sua solução ou prevenção.

As falhas prematuras são aquelas que ocorrem logo no início de funcionamento do equipamento ou sistema. São normalmente devidas a erros de projeto, erros de fabricação e montagem ou devidas a componentes abaixo do padrão (PIAZZA, 2000). Testes acelerados podem antecipar e evidenciar as falhas prematuras evitando que ocorram durante o uso normal do equipamento em produção (RAGAZZI, 2001). As falhas prematuras têm uma taxa de ocorrência decrescente, ou seja, são menos freqüentes á medida que o equipamento entra em operação normal e as falhas iniciais são corrigidas.

As falhas casuais ou aleatórias resultam de causas complexas, incontroláveis e, muitas vezes, desconhecidas. Normalmente ocorrem durante a vida útil do equipamento e possuem uma taxa de ocorrência praticamente constante (PIAZZA, 2000). Lafraia (2001) cita colisões, sobrecargas momentâneas, fenômenos naturais e erros humanos entre as causas de falhas ocasionais, recomendando o treinamento como forma de evitar os erros humanos. Para o autor, estas causas podem provocar falhas apenas momentâneas ou desencadear um processo de deterioração, como ocorre, por exemplo, quando um rolamento é marcado por uma sobrecarga radial ou axial.

Moubray (2000) toma o exemplo de danos em rolamentos para afirmar que estas causas casuais ou aleatórias podem introduzir falhas potenciais ou ocultas que, apesar de não serem visíveis, podem ser detectadas e acompanhadas até o momento em que o rolamento atinja níveis críticos de

ruído e vibração. O autor cita tarefas preditivas de acompanhamento da falha potencial como uma forma de planejar a intervenção e, assim, evitar uma parada não programada.

As falhas que ocorrem por desgaste, por sua vez, estão ligadas ao tempo de uso do equipamento e começam a aparecer quando os componentes ou conjuntos têm ultrapassado seus períodos de vida útil (PIAZZA, 2000). Para este tipo de falha, pode-se aplicar intervenções de manutenção preventiva que permitam recuperar o desgaste existente e/ou reajustar o sistema para a nova condição do equipamento, procurando preservar a função do componente ou conjunto (KARDEC & LAFRAIA, 2002).

Os componentes utilizados nos diversos tipos de equipamentos podem apresentar um ou mais tipos de falhas, dependendo de suas características de fabricação, material utilizado, função, etc. A gestão destas falhas depende da definição das funções de cada elemento, seus padrões de desempenho, sua criticidade, suas possíveis falhas funcionais e modos de falha e a caracterização destas falhas dentro dos tipos apresentados.

O estudo do histórico destas falhas, dentro de uma análise de confiabilidade, permite determinar as ações de manutenção e sua periodicidade para cada modo de falha. Este estudo de confiabilidade constitui-se, portanto, em uma ferramenta para a gestão de falhas, procurando evitar as paradas não programadas dos equipamentos, além de, em certos casos, garantir a segurança operacional.

3.2. CONFIABILIDADE COMO FERRAMENTA DE MELHORIA DE PROJETOS E PROCESSOS

Um dos aspectos abordados no desenvolvimento de novos produtos é a necessidade de se conhecer a confiabilidade do produto ainda na fase de projeto. Segundo Prendergast *et al.* (1996), as exigências de níveis de confiabilidade cada vez maiores por parte dos clientes estão exigindo que os

fabricantes gastem mais dinheiro em testes acelerados, em lotes cada vez maiores e com testes mais aprimorados.

Falando especificamente sobre componentes eletrônicos, Prendergast *et al.* (1996) afirmam que, como a evolução deste tipo de produto é muito rápida, os tempos empregados nos testes acelerados também passam a inviabilizar esta forma de aprimoramento do produto. Os autores sugerem o que chamam de *"building-in reliability approach".* Esta técnica consiste em fazer dos clientes um laboratório de testes com a participação efetiva do usuário do componente. Neste processo, os autores ressaltam a necessidade de um compromisso por parte dos clientes no envio dos dados de falha dos componentes de forma sistemática. O cliente torna-se, então, parceiro do fabricante. Nesta parceria, o cliente se compromete a enviar os dados sobre o produto e recebe, em troca, a evolução constante deste produto em forma de melhorias. Ainda neste artigo, os autores citam as ferramentas que podem ser utilizadas no diagnóstico e solução dos problemas potenciais e daqueles relatados em campo pelos clientes. Entre as ferramentas mencionadas, aparecem o FMEA – *Failure Mode and Effect Analysis* (Análise de modos e efeitos de falhas) e o Diagrama de *Ishikawa*, também conhecido como Diagrama de Causa e Efeito ou Diagrama Espinha de Peixe.

Ragazzi (2001) também cita os testes acelerados como uma forma de se obter valores de confiabilidade de novos produtos durante sua fase de projeto. Alerta para a discussão polêmica sobre os testes acelerados, na medida em que os meios utilizados para simular, de forma acelerada, a tensão a que o produto será submetido podem não condizer com a realidade das condições de campo. O autor cita, também, os dados de campo como fonte para a definição de confiabilidade, lembrando que a dificuldade de se obter os dados de campo é um limitador no uso desta forma de obtenção dos valores de confiabilidade.

Marcorin (2002) também cita dados de campo como uma forma econômica de se obter valores de confiabilidade e discute uma alternativa para estudos de confiabilidade baseados em dados de campo fortemente censurados. Segundo o autor, é considerado como censura o dado de falha que não pode ser

apontado, quer seja por não se observar a falha durante o período estudado ou outra razão que não permita seu apontamento.

Os dados de campo são também citados por Wang *et al.* (1999) como forma de se conhecer a confiabilidade de produtos novos, porém similares a outros já produzidos. Os autores descrevem a importância da coleta de dados para o estudo de confiabilidade de equipamentos de produção, particularmente de máquinas CNC. Segundo os autores, a necessidade de prover as máquinas CNC com maior confiabilidade exige que os fabricantes de máquinas coletem dados de campo para análise e tomada de ações para a melhoria do equipamento. A organização das informações de campo em banco de dados eficientes é o ponto central do artigo. Para o autor, existe a necessidade de organizar os dados de forma codificada, de modo a permitir que os fabricantes calculem valores de confiabilidade e manutenabilidade no nível da máquina (sistema), subconjuntos e componentes. Uma base de dados adequada pode permitir que *softwares* adequados possam apresentar gráficos de distribuição de falhas, desempenho e outros, de modo a orientar os estudos de confiabilidade. Para tanto, o autor sugere uma metodologia de codificação de conjuntos, componentes e falhas apresentadas, e sugere, ainda, gráficos que podem ser utilizados no processo.

Os autores também citam ferramentas como FMEA e FTA – *Fault Tree Analysis* (Análise de árvore de falhas) que podem utilizar-se dos bancos de dados. A dificuldade de se obter dados confiáveis após o período de garantia também é abordada no trabalho. Segundo os autores, o problema reside no fato de que os clientes deixam de chamar o fabricante e passam a chamar terceiros ou utilizar mão-de-obra própria para o reparo de seus equipamentos. Esta política dificulta a obtenção dos dados de falhas e provoca distorções nas análises de confiabilidade destes equipamentos por parte dos fabricantes.

Düpow & Blount (1997) apresentam diversas formas de obtenção de valores de confiabilidade, formulações, metodologias e considerações a respeito. Segundo os autores, os clientes de todas as áreas passaram a exigir maior confiabilidade dos produtos e serviços prestados pela indústria, comércio e

governo, salientando a ligação estreita entre confiabilidade e segurança. De outro lado, a falta de confiabilidade resulta em perda de negócios. Um alto índice de confiabilidade pode ser obtido superdimensionando os equipamentos, porém torna-se economicamente inviável este tipo de prática, sendo necessária a predição da confiabilidade para verificar se o produto está adequado, superdimensionado ou se requer melhorias. A predição da confiabilidade deve proporcionar ao projetista possibilidades de melhoria e redução dos custos decorrentes de superdimensionamento e principalmente decorrentes de modificações posteriores. Os autores afirmam existir diversos métodos de cálculo antecipado de confiabilidade apresentados na literatura existente, porém apenas para componentes eletrônicos e *softwares*, e sugere o método de decomposição dos componentes em blocos para a definição de confiabilidade de equipamentos mais complexos. Trata-se de utilizar valores conhecidos de confiabilidade dos elementos que compõem o equipamento para a projeção da confiabilidade final. Os blocos são, então, associados em série ou paralelo, segundo suas funções, são atribuídos valores de confiabilidade a cada bloco e calcula-se a confiabilidade total. Como exemplo, o autor mostra o processo de definição da confiabilidade de um freio de motor utilizando a decomposição de blocos funcionais. Os autores citam também o método da predição de confiabilidade, que define os fatos que influenciam a confiabilidade. Independente da metodologia, a definição da confiabilidade antecipada deve levar à melhoria do produto.

Os autores citam, ainda, o FMEA, FTA e outras ferramentas como suporte das metodologias apresentadas. O artigo é finalizado enfatizando a necessidade de que os tempos de vida e funções desejadas para cada equipamento devem ser bem definidos para balizarem as ações de melhoria, no sentido de se obter sempre o melhor custo - benefício na melhoria da confiabilidade dos equipamentos.

A questão do superdimensionamento também foi abordada por Lafraia (2001). A possibilidade de substituir grandes coeficientes de segurança por um estudo profundo de confiabilidade na elaboração de projetos é citada pelo autor como

vantagem ao emprego da confiabilidade. Para o autor, a falha deve deixar de ser tratada como algo a ser evitado a todo custo através do super-dimensionamento e deve ser tratada de forma probabilística através de estudos de confiabilidade.

A SAE International (1992) também apresenta o *R&M Plan,* ou Plano Confiabilidade/Manutenabilidade, como uma forma de gerenciar um projeto, desde a concepção até o descarte final. Portanto, em todo o ciclo de vida do produto, com um forte apelo à confiabilidade do produto. Neste plano, a participação do cliente é essencial e o plano é efetivamente administrado numa parceria cliente - fornecedor, nos mesmos moldes definidos por Williams *et al.* (1994) como terotecnologia, que consiste, basicamente, em um retorno das informações das falhas ocorridas no cliente para o fornecedor, para que este melhore o produto.

A confiabilidade dos sistemas também está na base das preocupações com riscos dos mais diversos tipos em projetos, especialmente daqueles que envolvem a comunidade, como linhas de energia e transporte coletivo. É o que afirmam Tummala & Leung (1996), que abordam a aplicação do RMP - *Risk Management Process* (Processo de Gerenciamento de Risco), um processo baseado em conceitos de confiabilidade, como uma ferramenta capaz de direcionar adequadamente projetos com forte preocupação com confiabilidade e segurança. Segundo os autores, o RMP permite ranquear os problemas potenciais de um sistema através de uma análise de probabilidades. Ainda, segundo os autores, esta ferramenta de desenvolvimento de projetos com preocupação em confiabilidade é utilizada na tentativa de reduzir os riscos envolvidos, inclusive sendo citado um estudo de caso com uma empresa não identificada. Novamente, outras ferramentas são citadas como apoio ao RMP, como o FTA – *Fault Tree Analysis* ou Análise de Árvore de Falhas, o CCA – *Cause Consequence Analysis* ou Análise de Causa e Efeito e, especialmente, o FMEA, já discutido anteriormente. O FMEA, aliás, é citado como parte integrante do processo RMP, sendo esta ferramenta responsável por externar

os problemas que podem significar riscos para a confiabilidade e a segurança dos sistemas.

Dhillon & Yang (1995) abordam os erros humanos durante o projeto como fator de redução da confiabilidade dos projetos, que acabam por reduzir a confiabilidade e a segurança do produto final. Em outro artigo, Dhillon & Fashandi (1999) discutem a confiabilidade de sistemas robotizados. Neste artigo, os autores discutem a necessidade de sistemas redundantes de segurança para os robôs como uma melhoria do projeto destes sistemas para a melhoria da confiabilidade e da segurança. Voltam a ressaltar a necessidade de aumentar a confiabilidade destes sistemas para reduzir os riscos com segurança, os custos de manutenção e outras inconveniências decorrentes da falta de confiabilidade, tanto dos robôs, como de seus sistemas de segurança. Nesta linha, os autores propõem novos modelos matemáticos para estudos de confiabilidade considerando sistemas de segurança redundantes. Os autores concluem seu trabalho afirmando que parâmetros como precisão e repetibilidade não são suficientes para o sucesso do emprego de robôs em sistemas de produção; é necessário obter confiabilidade destes sistemas para que possam apresentar disponibilidade e qualidade no desempenho do processo e na manufatura do produto.

Também focalizado na redução da confiabilidade devido a erros humanos e mesmo a catástrofes da natureza, McLachlan (1995) sugere uma forma de evitar estes erros e melhorar a confiabilidade dos sistemas a partir de seu projeto, através de uma pergunta simples: “O que de pior pode ocorrer?”. Esta pergunta simples exige, entretanto, uma análise profunda dos problemas potenciais, por mais improváveis que possam parecer. O autor parte de um conceito muito claro, ou seja, um acidente pode ser evitado quando se sabe que ele pode ocorrer. Baseado nisto, o autor vai ao extremo e lembra acidentes ocorridos em diversos sistemas como trens, navios e catástrofes como furacões e terremotos, e como estes poderiam ser evitados ou suas conseqüências minimizadas se alguém tivesse imaginado que poderiam ocorrer e tivesse tomado providências para minimizá-los. Em um nível

industrial, o autor cita ainda falhas e retrabalhos que poderiam ser evitados se a pergunta fosse feita. Neste contexto, o autor lembra o custo desta não – confiabilidade, que pode resultar em problemas com a imagem da empresa. O autor segue sua análise tomando exemplos de falhas humanas que causaram acidentes, falhas em cascata, vazamento de informação e até rejeição de produtos pelo mercado. Conclui que a melhor forma de evitar estas falhas é sempre fazer a pergunta: "O que de pior pode ocorrer?". Desta forma, segundo o autor, a mente do projetista pode se abrir para a prevenção ou redução da probabilidade de ocorrerem estas falhas.

Tennant (1995) apresenta um estudo de caso de aplicação de conceitos de confiabilidade no gerenciamento de projetos na empresa Rover, Inglaterra. Segundo o autor, a Rover fez um *benchmarking* de manutenção, ou seja, uma pesquisa entre as empresas com os melhores resultados na área, para definir a melhor política e optou pela adoção de um programa chamado *Q&R Plan,* ou Plano Qualidade e Confiabilidade. O plano baseia-se em grupos de trabalho multidisciplinares guiados por *check lists* pré-definidos de ações para cada elemento. Estas ações são definidas e coordenadas por uma equipe central, responsável pelo projeto de um novo produto. Os *check lists* prevêem todos os passos que os grupos devem seguir, orientando o uso das mais variadas técnicas de diagnóstico e solução de problemas potenciais no projeto e em todas as fases do processo de produção. Todo o trabalho é documentado e confrontado com os dados originais do plano Q&R. Entre as ferramentas de apoio ao desenvolvimento do plano, estão os FMEAs de projeto e de processo para os itens críticos, que o plano chama de *RCI´s – Reliable Critical Itens* ou itens críticos quanto a sua confiabilidade. O plano salienta a importância da documentação de todas as fases analisadas no plano Q&R como fonte de aprendizado para outros projetos que é o cerne de um plano de melhoria contínua.

Esta relação entre confiabilidade e qualidade também foi observada por Madu (1999). Para o autor, qualidade não é suficiente para garantir competitividade no mercado e a confiabilidade é essencial para o desenvolvimento de um

sistema de qualidade, especialmente para atender o cliente de alta tecnologia. O autor lembra que as novas tecnologias de comunicação, como a *internet,* alteraram as relações entre cliente e fornecedor, fazendo surgir a figura do cliente e fornecedor virtuais, o que dificulta a medição da satisfação do cliente. Esta situação coloca os valores de confiabilidade e manutenabilidade como fatores para a satisfação do cliente. Neste contexto, o autor sugere a utilização do *TRM – Total Reliability Management,* ou gerenciamento da confiabilidade total, como ferramenta gerencial em substituição ou em conjunto com o *TQM – Total Quality Management* ou gerenciamento da qualidade total. O TRM utiliza ferramentas como o ciclo PDCA (*plan, do, check, act*) e QFD – *Quality Function Deployment* (Desdobramento da Função Qualidade) para o aprimoramento do produto. Desta forma, a disposição de ouvir o cliente torna-se essencial para o TRM na busca da melhoria da confiabilidade e da qualidade dos produtos oferecidos ao mercado, especialmente o QFD na canalização dos esforços de *benchmarking*. Além do ciclo PDCA, muito citado pelo autor como um processo essencial e interminável na melhoria contínua. O autor cita ainda o Diagrama de Causa e Efeito (Ishikawa) como ferramenta para análise das falhas encontradas. Ele termina reafirmando a necessidade de ouvir os clientes e também de manter a atenção em atributos de confiabilidade não externados pelos clientes que podem significar diferenciais de venda.

Assim como a confiabilidade é apresentada pelos autores citados neste item, como ferramenta de melhoria de projetos, outros autores, citados a seguir, apontam a confiabilidade também como ferramenta de melhoria da qualidade do processo de fabricação.

Graves *et al*. (1999) discutem a aplicação dos conceitos de redundância e do controle de qualidade por amostragem na busca por confiabilidade dos sistemas de produção e, consequentemente, dos produtos produzidos, enfatizando que é melhor tomar ações preventivas para evitar a falha a ter que medir os resultados do processo na busca de falhas. Os autores afirmam que o controle da confiabilidade por amostragem está caindo em desuso e dando lugar a sistemas redundantes. Entende-se por sistema redundante aquele que

prevê dois ou mais sistemas trabalhando em paralelo, de modo que quando um falha, o outro mantém o sistema em operação. No entanto, os autores mostram um modelo matemático que pretende confirmar que ambos os conceitos (redundância e amostragem) podem ser utilizados conjuntamente em diferentes níveis na busca de maior confiabilidade dos produtos e processos.

Prendergast *et al.* (1996) também abordam a importância dos estudos de confiabilidade para a fase de fabricação dos produtos. Enfatizam a necessidade de um controle de confiabilidade do processo de produção como chave para obtenção de um produto final também confiável.

Johnson *et al.* (1999) estudam em seu artigo a confiabilidade dos diversos processos de soldagem de componentes eletrônicos. Através de um estudo de confiabilidade realizado a partir de amostras coletadas nos diversos processos, os autores puderam identificar as vantagens e desvantagens de cada processo e as alterações necessárias para a melhoria da confiabilidade do produto final em cada processo.

Foram apresentados neste item diversas literaturas que demonstram a aplicabilidade dos estudos de confiabilidade à melhoria de projetos e processos. Uma vez tendo o produto acabado e conhecendo-se os valores de confiabilidade determinados durante seu projeto e execução, pode-se utilizar estes valores, em conjunto com dados reais de campo, para uma melhor definição das ações de manutenção, como discutido nas literaturas apresentadas a seguir.

3.3. CONFIABILIDADE APLICADA À MANUTENÇÃO

Da mesma forma que foram apresentadas literaturas que mostram os conceitos de confiabilidade aplicados à melhoria de processos e produtos, são apresentadas e comentadas, a seguir, as literaturas que trazem a confiabilidade aplicada à manutenção e ao seu gerenciamento, como ferramenta para definir riscos e ações dentro da função manutenção.

Para Lafraia (2001), "a confiabilidade do equipamento é quase inteiramente uma função da qualidade do programa de manutenção". O autor afirma que a confiabilidade inerente do equipamento, definida no projeto, é pouco relevante se uma boa política de manutenção não der suporte efetivo para atingir os índices de confiabilidade ali definidos.

Kumar (1997) aborda a confiabilidade de sistemas tolerantes a falhas. Entende-se por sistemas tolerantes a falhas os sistemas que, mesmo em estado de falha, podem manter seu funcionamento. O autor, entretanto, afirma que, mesmo nestes sistemas, uma falha produz redução do desempenho operacional devido à degradação deste desempenho; em outras palavras, o autor considera que mesmo os equipamentos tolerantes a falhas têm redução de desempenho quando a falha ocorre. Esta redução de desempenho deve ser considerada na análise da confiabilidade e disponibilidade do sistema. Para tanto, o autor apresenta modelos matemáticos para análise de confiabilidade deste tipo de sistema. O autor afirma que outros modelos já foram adotados com o mesmo propósito, porém levando em consideração apenas um nível de *stress* para o equipamento em estudo e considerando distribuição exponencial de falhas. No modelo por ele apresentado, são considerados vários níveis de *stress* para um mesmo equipamento e outras formas de distribuição de falhas.

Relembrando o berço dos conceitos de aplicação de confiabilidade na manutenção, Kumar (1999), em outro artigo, descreve novos conceitos utilizados na manutenção baseada em confiabilidade utilizada pelas companhias aéreas. O autor cita uma estatística que mostra que 11% dos custos totais com a operação das companhias aéreas estão ligados a custos de manutenção e cita cifras importantes na aviação civil e militar do Reino Unido, demonstrando a importância da manutenção nesta área. Prossegue afirmando que valores de MTBF já não são suficientes para orientar as ações de manutenção. Segundo o autor, há grande dificuldade em se utilizar este índice no planejamento da manutenção, especialmente porque a distribuição de falhas nem sempre se comporta de forma exponencial. Além disso, não se pode prever que um novo item terá a mesma taxa de falhas de seus

equivalentes funcionais. Em função destas dificuldades, as companhias aéreas passaram a adotar o conceito de *Maintenance Free Operating Period* – MFOP ou Período de Operação Livre de Manutenção. O autor traz um exemplo de cálculo do MFOP para uma distribuição de falhas que segue o modelo de *Weibull* e mostra a versatilidade da distribuição de *Weibull* em função dos parâmetros de ajuste do modelo. O artigo prossegue descrevendo os impactos que a definição do MFOP exerce sobre a programação de estoque de peças de reposição. Como o tempo de vida até a próxima falha pode ser estimado, fica mais fácil prever a necessidade da peça e, com isto, reduzir os custos do estoque, além de poder proporcionar melhores condições logísticas para as operações de manutenção. O autor finaliza enfatizando que o uso do MFOP deve ser feito no âmbito de uma estratégia de gerenciamento de uma manutenção centrada em confiabilidade.

A confiabilidade dos processos e meios de produção é também apresentada como razão dos sistemas de gerenciamento da manutenção de equipamentos. Kitamura & Fukumoto (2001) descrevem sua experiência na empresa Kawasaki Steel, Japão, onde foi implantado um sistema de gerenciamento da manutenção de equipamentos da produção com forte ênfase nos estudos de confiabilidade. Os autores apresentam as ações de manutenção em três tipos: BM – *breakdown maintenance* ou manutenção após a quebra (corretiva), TBM – *time-based maintenance* ou manutenção baseada no tempo (preventiva) e CBM – *condition-based maintenance* ou manutenção baseada em condições (preditiva). Apresentam, ainda, um histórico da evolução da função manutenção para traçar um paralelo com a evolução da manutenção na Kawasaki Steel. Segundo os autores, a empresa caminhou sempre junto com o histórico da manutenção e aplica cada vez mais tempo e recursos em manutenções do tipo CBM, à medida que novas tecnologias de diagnóstico são disponibilizadas no mercado. Os autores têm a preocupação de mostrar a necessidade de se obter altos índices de confiabilidade para os equipamentos de produção, especialmente para os equipamentos de alta tecnologia, e definem o gerenciamento da manutenção como ponto crucial para atingir este objetivo. Afirmam que é impossível obter a confiabilidade desejada para estes

equipamentos sem uma manutenção realmente centrada na obtenção de resultados.

Outro aspecto importante é que a confiabilidade de equipamentos produtivos não pode ser considerada de forma isolada em um sistema de manutenção. Outros fatores como manutenabilidade e suportabilidade também devem ser considerados para que uma política de manutenção centrada em confiabilidade não seja frustrada por estes outros dois fatores.

Kumar & Knezevic (1998) ressaltam a necessidade de considerar os tempos de suporte (suportabilidade) no cálculo da disponibilidade de equipamentos. Para os autores, calcular a disponibilidade levando-se em consideração apenas a confiabilidade e a manutenabilidade é um erro e que a suportabilidade, definida como capacidade de obtenção de suporte técnico e peças de reposição, tem papel fundamental nesta análise. Apesar da suportabilidade estar ligada ao suporte pós-venda, os autores afirmam que esta análise da suportabilidade deve ser conduzida também durante a fase do projeto, na tentativa de prever adequadamente o suporte, especialmente com peças de reposição. Esta suportabilidade, calculada como o tempo médio para suporte ou MTTS – *mean time to support*, é levada em consideração em três modelos matemáticos apresentados pelos autores para análise de disponibilidade de equipamentos. Um destes modelos foi desenvolvido para uma taxa de falhas constante, enquanto os outros dois modelos trabalham a questão em casos onde a taxa de falhas não é constante.

Outro aspecto abordado por alguns trabalhos aponta para os erros humanos como causa da redução dos índices de confiabilidade de sistemas. Segundo Dhillon & Yang (1995), estes erros humanos são cometidos desde a fase de projeto, até a operação final do equipamento, levando sempre à redução da confiabilidade do sistema. Ainda segundo os autores, 25% dos eventos de manutenção são devidos a falhas humanas e apontam para a sujeira, fadiga, stress, falta de manutenção e outros fatores como responsáveis pela falha humana. Contestam estudos anteriores que afirmam que estas falhas têm uma taxa constante. Para eles, este tipo de falha concentra-se em fases de fadiga e

stress. Baseados nesta constatação, os autores apresentam um modelo matemático para cálculo de confiabilidade de sistemas com redundância que leva em consideração as falhas humanas, com taxas de falhas variáveis. Para tanto, fazem algumas considerações, entre elas a que as falhas humanas acontecem independentemente de outros tipos de falhas.

Dhillon & Yang (1996) estudaram, também, a confiabilidade de sistemas robotizados. Segundo os autores, o MTBF – *Mean time between failures* ou tempo médio entre falhas apresentado por robôs é de apenas 2500 horas. Isto se deve à complexidade de seus sistemas e sub-sistemas. Face à importância dos robôs na produtividade e da crescente exigência na melhoria de seus índices de confiabilidade, o estudo desta confiabilidade deve ser feito de forma a promover a melhoria da qualidade destes sistemas, principalmente dos sistemas de segurança associados. A questão da segurança é inclusive ressaltada pelos autores como fator determinante para a melhoria destes sistemas, face ao grande número de acidentes observados. Cita-se neste trabalho que 8% dos operadores de robôs já sofreram algum tipo de ferimento em acidentes com estes equipamentos, enquanto 36% já tiveram algum tipo de acidente. Em função da importância dos sistemas de segurança associados aos robôs e dos riscos originados por falhas nestes sistemas, os autores apresentam dois modelos matemáticos para cálculo de confiabilidade, que consideram a integração entre o sistema de robô e o sistema de segurança. Estes modelos prevêem que um dos sistemas pode falhar e, também, que ambos podem falhar.

Os conceitos de confiabilidade também podem ser utilizados para suportar análises de risco e políticas de manutenção de pontes. O assunto é apresentado por Stewart (2001), que vê na aliança da análise de riscos com estudos de confiabilidade uma ferramenta poderosa para auxílio nas tomadas de decisão. Esta análise de confiabilidade e risco deve nortear as ações de manutenção possíveis com o devido estudo de custos. O assunto *life-cycle cost* ou custo do ciclo de vida é bastante utilizado pelo autor, aliando confiabilidade e análise de custos, desde a fase do projeto, até o descarte das pontes. O

autor apresenta uma análise de confiabilidade baseada no tempo de deterioração das pontes e baseada nas cargas normais e sobrecargas possíveis na estrutura. Com base neste estudo, afirma poder gerenciar adequadamente a vida da ponte, programando as manutenções necessárias, priorizando as intervenções em um conjunto de pontes e determinando os riscos e custos do ciclo de vida de cada ponte.

Garbatov & Soares (2001) discutem a confiabilidade de estruturas flutuantes. Para os autores os estudos de confiabilidade e custos devem direcionar as ações de manutenção preventiva necessárias à segurança do sistema e disponibilidade operacional. Os autores apresentam modelos matemáticos para estudo de confiabilidade de sistemas flutuantes e um estudo comparativo de estratégias de manutenção com exemplos de custo e confiabilidade variáveis para diversas situações de carga, demonstrando graficamente a relação custo-benefício envolvida. Nesta mesma linha de análise de custo - benefício, Murty & Naikan (1995) apresentam uma discussão sobre os investimentos em manutenção, afirmando que é preciso investir em manutenção para aumentar a confiabilidade dos sistemas de produção, mas que nem sempre altos gastos trazem benefícios globais.

3.4. RCM - *RELIABILITY-CENTRED MAINTENANCE*

Entre as várias literaturas que discutem a confiabilidade dentro da manutenção, muitas se concentram na discussão do RCM – *Reliability-Centred Maintenance* ou Manutenção Centrada em Confiabilidade (MCC) como uma metodologia para conduzir as ações de manutenção.

Moubray (2000) apresenta RCM como uma filosofia de trabalho, como “um processo usado para determinar o que deve ser feito para assegurar que qualquer ativo físico continue a fazer o que seus usuários querem que ele faça no seu contexto operacional”, ou seja, o RCM é uma metodologia que identifica, no contexto de cada operação, quais as ações mais indicadas para a preservação das funções existentes na operação, em contraste com visões

anteriores que focavam o ativo e não sua função. Como o nome diz, RCM trata a manutenção através de um estudo de confiabilidade de cada sistema. Ainda, para Moubray (2000), o RCM é o marco da terceira geração da função manutenção, baseada em pesquisa e técnicas científicas.

Neste processo, cabe à manutenção identificar o índice da confiabilidade de cada equipamento e do processo como um todo, e como esta confiabilidade pode ser melhorada. Pela sua característica científica, requer uma equipe de manutenção mais especializada para desenvolver os estudos de confiabilidade. É a chamada Engenharia de Manutenção. Novamente, aqui, os resultados compensam os custos. Um bom estudo de confiabilidade pode dar ao sistema maior racionalidade na aplicação dos recursos destinados a manutenção, melhor controle de estoque de peças, das ordens de serviço e das paradas programadas. O RCM vem auxiliar na otimização do nível de disponibilidade de máquinas e dos custos, na medida em que permite reduzir de 40% a 70% as intervenções periódicas (MOUBRAY, 2000).

Em seu trabalho, Moubray (2000) apresenta o RCM não como uma estratégia pronta, mas como uma ferramenta poderosa no desenvolvimento da estratégia de manutenção a adotar para cada ativo, baseada em sua função. Afirma que o RCM possibilita o gerenciamento mais adequado de mão-de-obra, peças de reposição, falhas ocultas e, como conseqüência, possibilita gerenciar e reduzir adequadamente os custos de manutenção. O autor apresenta toda a metodologia a ser seguida na implantação do RCM.

Smith (1993) aborda o RCM de forma mais concentrada na função de otimizar a manutenção preventiva e, com base neste propósito descreve os conceitos, procedimentos e ferramentas envolvidos na utilização do RCM. Assim como Moubray, o autor em questão também apresenta exemplos do uso de confiabilidade na definição das atividades de manutenção, também focando a função do equipamento como o alvo a manter. Smith (1993) também aborda a questão da redução de custos pela aplicação do RCM lembrando o nascimento desta ferramenta na indústria aeronáutica. No trabalho citado, pode-se verificar que o estudo de confiabilidade e as ações tomadas a partir dele permitiram às

companhias reduzir os custos com manutenção, à medida que adequaram os sistemas para adquirirem redundância. Este processo de redundância permitiu aplicar, em muitos sistemas, ações apenas corretivas, reduzindo os custos com verificações preventivas.

Garbatov & Soares (2001) estudaram a opção de uso do RCM na redução de custos de manutenção em estruturas flutuantes. Apesar de aplicado em uma área não industrial, seus cálculos mostraram que o RCM reduz os custos à medida que reduz o número de intervenções. Mais aplicado à indústria, Deshpande & Modak (2001) apresentam um estudo de aplicação do RCM em uma fundição na Índia. Para os autores, o RCM permite selecionar a técnica de manutenção mais apropriada para cada equipamento, identificar e combater adequadamente os modos de falha conhecidos e potenciais e reduzir os custos com manutenção. Ainda, o RCM não deve ser utilizado apenas para depurar os tempos de manutenção preventiva, mas deve ser encarado como uma nova forma de administrar o desempenho dos equipamentos e os recursos de manutenção. O trabalho apresenta uma retrospectiva do RCM no mundo até o estágio atual de aplicação da ferramenta.

Um estudo de caso apresentado por Pintelon *et al.* (1999) questiona a utilização do RCM. Constitui-se em um estudo de caso de aplicação do RCM em uma célula de pintura conduzida por robôs em uma indústria automobilística. Inicialmente, os autores definem o que chamam de conceito de manutenção como um conjunto de ações de diferentes tipos de manutenção como corretivas, preventivas, baseada em condições, etc. Para estes autores, é importante definir a manutenção mais apropriada para cada caso em função de uma análise custo-benefício. Esta definição da melhor política de manutenção para cada caso é difícil, especialmente para equipamentos complexos e de alto grau de automação. O ponto ótimo no uso dos conceitos deve, segundo os autores, ser obtido sob a óptica da efetividade e eficiência, medidas em termos de confiabilidade e disponibilidade. O artigo mostra como o RCM, especialmente aquele apresentado por Moubray (2000), foi customizado e aplicado na indústria em questão (o nome da empresa não é divulgado no

trabalho) com bons resultados. Os autores ainda abordam o uso conjunto do RCM com o TPM e outros conceitos, não informando, entretanto, se foram utilizados no caso apresentado. Salientam que, em geral, os conceitos devem ser utilizados conjuntamente, segundo as características de cada equipamento. Comparam quatro outros autores distintos que apresentam conceitos conhecidos, ressaltando suas diferenças e as vantagens apresentadas pelo RCM, particularmente pelo RCM II, proposto por Moubray. Os autores concluem que, após analisar todos os conceitos conhecidos, a empresa em estudo obteve ganhos importantes de confiabilidade e disponibilidade com a adoção do RCM, chegando à conclusão que os esforços são compensadores.

A interação entre RCM e TPM – *Total Productive Maintenance* ou Manutenção Total da Produção também é discutida por Ben-Daya (2000), que ressalta a importância do RCM na obtenção de bons resultados na utilização do TPM. O autor cita os benefícios do TPM e sua metodologia, citando a manutenção planejada como um dos pilares do TPM. Para o autor, é exatamente neste pilar que o RCM deve ser aplicado, otimizando as intervenções de manutenção preventiva pela confiabilidade dos sistemas e não mais pelo tempo transcorrido entre intervenções, evitando que intervenções desnecessárias sejam feitas ou que a quantidade de intervenções seja insuficiente para evitar as falhas nos equipamentos.

O confronto entre TPM e RCM também é apresentado por Fleming & França (1997) para a indústria de processos. Os autores fazem um paralelo entre as metodologias que, em primeira análise, parecem confrontar-se, principalmente quanto ao enfoque que cada metodologia dá aos equipamentos. Enquanto o TPM prega a quebra zero de qualquer equipamento, o RCM analisa cada equipamento segundo sua importância no processo. Apesar do aparente conflito, os autores entendem que o RCM pode ser um aliado do TPM, na medida que pode auxiliar no planejamento da manutenção através do diagrama de decisão característico do RCM.

3.5. Confiabilidade e ferramentas de suporte

Muitas literaturas citam ferramentas para auxílio ao uso dos conceitos de confiabilidade, desde o projeto, até a manutenção dos produtos. Estas ferramentas se constituem desde ferramentas já reconhecidas em outras áreas, até *softwares* específicos para cálculo de confiabilidade.

Citando ferramentas para suporte a estudos de confiabilidade, Teng & Ho (1996) apresentam um trabalho sobre a aplicação do FMEA e do FTA. Os autores sugerem o FMEA como ferramenta para melhorar a confiabilidade de projetos e processos de produção, resultando em produtos também mais confiáveis. Já o FTA é sugerido como ferramenta para encontrar soluções para as falhas apresentadas pelos produtos, proporcionando melhoria contínua na qualidade e confiabilidade. Os autores citam as dificuldades para a implantação do FMEA de forma sistemática nas empresas, observando que a ferramenta acaba sendo utilizada apenas como cumprimento a exigência de seus clientes, principalmente montadoras, sem um empenho adequado em utilizar a ferramenta como meio efetivo e sistemático de melhoria da confiabilidade e da qualidade.

Jinglun & Quan (1998) apresentam uma ferramenta alternativa para a depuração de problemas. Segundo os autores, o FTA pode ser substituído por uma análise mais lógica do problema, adotando um modelo binário chamado *Binary Decision Diagram* – BDD ou diagrama de decisão binária, que utiliza conceitos de lógica binária para chegar à solução do problema. O artigo enfatiza, através de exemplos comparativos, que este novo modelo de análise de falhas demanda uma quantidade menor de tempo para se chegar à solução e é mais preciso, portanto pode proporcionar maior confiabilidade à ação de manutenção. O artigo traz, ainda, uma receita para converter uma árvore de falhas em um diagrama de decisão binária.

Diferentemente do apresentado anteriormente, o FTA também é apresentado por Xie *et al*. (2000) como uma ferramenta para definir um ranqueamento dos

elementos do sistema segundo sua importância para a confiabilidade final do sistema, e assim definir as prioridades nas ações de melhoria do sistema.

Prendergast *et al.* (1996) também citam as ferramentas que podem ser utilizadas no diagnóstico e solução dos problemas potenciais e daqueles relatados em campo pelos clientes. Entre as ferramentas mencionadas, novamente aparecem o FMEA e o Diagrama de Ishikawa. FMEA é a ferramenta mais citada pelos autores, seguida pelo FTA. São citadas, ainda, por Tummala & Leung (1996), Tennant (1995), Wang *et al* (1999), Deshpande & Modak (2001) e Düpow & Blount (1997). Outras ferramentas, como QFD e ciclo PDCA, são ainda citadas por Madu (1999).

A SAE International (1992) também traz algumas ferramentas além daquelas já citadas, como TGR/TGW - *Things Going Right / Things Going Wrong* ou Coisas que deram certo / Coisas que deram errado, que consiste em um registro sistemático das soluções implementadas em projetos anteriores que deram certo e as que deram errado, para guia de novos projetos. RCA - *Root Cause Analysis* ou análise da causa raiz é outra ferramenta apresentada no mesmo trabalho, consistindo em um estudo aprofundado da causa das falhas para se encontrar, efetivamente, a raiz do problema.

Na discussão sobre ferramentas de *software* para suporte aos cálculos de confiabilidade, Hastings e Ang (1995) discursam sobre a importância destes *softwares* na aplicação efetiva dos conceitos de confiabilidade nas diversas áreas. Os autores justificam o uso de *softwares* dedicados pelos recursos que apresentam, na forma de técnicas matemáticas, para definição da melhor distribuição a que se encaixam os eventos analisados. Este tipo de testes de adequação de distribuição, também conhecidos como "*best fit tests*", ou testes de aderência, são muito trabalhosos e demorados quando realizados a mão ou mesmo com o auxílio de papéis padronizados para este tipo de análise. Ainda para mostrar os benefícios do uso do *software* apresentado, os autores sugerem um exemplo de cálculo de confiabilidade de um produto testado que apresentou falhas e censuras.

Ragazzi (2001) apresenta o *software* MINITAB® como uma ferramenta nos cálculos de confiabilidade. Justifica o uso do *software* pela velocidade de processamento que o mesmo possibilita, em comparação com o uso de métodos convencionais de cálculo. Entretanto, o autor tem a preocupação de mostrar os conceitos matemáticos que estão por traz da operação do software, uma vez que situações específicas podem inviabilizar o seu uso.

Na descrição do sistema adotado pela Kawasaki Steel (KITAMURA & FUKUMOTO - 2001), fica evidente o uso de recursos computacionais para as fases de coleta de dados, diagnóstico e definição da solução de problemas potenciais que as tendências possam indicar. Neste contexto, pode-se perceber três pontos importantes no sistema. O primeiro ponto é a necessidade de utilização de tecnologia na coleta de dados de desempenho do equipamento, ponto que os autores citam como limitador do uso deste sistema. Ou seja, existem equipamentos de produção que não foram projetados para fornecer ou permitir a coleta de dados de desempenho. Outro ponto importante é o uso de conceitos de confiabilidade, suportados pela base de dados coletados ao longo do tempo, como espinha dorsal das análises e decisões sobre as ações de manutenção. O terceiro ponto é o uso de sistemas especialistas para o diagnóstico de falhas apresentadas pelos equipamentos, suportados por uma equipe que efetivamente domine os mesmos. Os autores concluem que a melhoria do sistema do gerenciamento da manutenção depende do uso cada vez maior de equipamentos capazes de fornecer os dados de desempenho e de sua deterioração em tempo real, e avanço da eficiência dos sistemas de análise de confiabilidade, de modo a depurar adequadamente as ações para cada tendência demonstrada, garantindo, desta forma, a confiabilidade do sistema de produção e do produto final.

Como nem sempre os *softwares* prevêem todas as condições possíveis, pode-se ver pelo já apresentado que muitos autores desenvolvem modelos matemáticos específicos para casos particulares. Modelos matemáticos para cálculo de confiabilidade de sistemas específicos foram apresentados por

Dhillon & Yang (1995), Dhillon & Yang (1996), Dhillon & Fashandi (1999) e Kumar (1997) em seus trabalhos, já comentados.

Na linha de apresentação de modelos matemáticos, Gopalan & Kumar (1995) apresentam um modelo mais genérico para cálculo de confiabilidade e manutenabilidade de sistemas redundantes. Segundo os autores, as formulações matemáticas até então apresentadas sempre consideravam uma distribuição exponencial das falhas e dos tempos de reparo. Estes autores apresentam uma formulação mais genérica que pode ser adaptada a qualquer tipo de distribuição de falhas e de tempos de reparo em sistemas redundantes. Para tanto, são utilizados alguns recursos matemáticos capazes de dar maior grau de adaptabilidade ao modelo apresentado e assim poder atender as diferentes distribuições apresentadas pelas falhas e tempos de reparo.

Ainda na linha de apresentação de modelos matemáticos para estudos de confiabilidade, Sridharan & Mohanavadivu (1998) apresentam um modelo para análise de confiabilidade de linhas de alimentação elétrica. Segundo os autores, outros modelos já foram apresentados para o mesmo tipo de estudo, porém não levavam em consideração os sistemas de proteção das linhas de alimentação. O estudo mostrado analisa a confiabilidade destes sistemas de alimentação associados a seus sistemas de proteção. Segundo os autores, não se pode analisar as linhas isoladamente ou apenas em relação às suas cargas, com suas possíveis interferências no desempenho da linha; deve-se também levar em consideração a confiabilidade dos sistemas de proteção que atuam junto às cargas para a proteção da linha. O autor compara esta consideração com qualquer outro sistema que possua subsistemas associados e que a falha de um sistema comprometa a confiabilidade do outro. Esta discussão mostra a importância da manutenção detectiva, discutida no item 2.5, que prevê a intervenção preventiva em equipamentos de proteção.

Estes 3 capítulos iniciais deste trabalho procuraram mostrar de que forma um estudo de confiabilidade pode contribuir no direcionamento das atividades de desenvolvimento, produção e principalmente nas atividades de manutenção de equipamentos. As literaturas resgatadas e apresentadas nestes capítulos

procuraram mostrar a evolução da manutenção e sua importância como função estratégica na obtenção de resultados nas empresas. Mostraram a relação entre manutenção e qualidade, produtividade e disponibilidade e de que forma as ações de manutenção podem ser direcionadas pelos estudos de confiabilidade.

O capítulo seguinte encerra o trabalho, mostrando um estudo de caso onde foram aplicados os conceitos de confiabilidade para o estudo do comportamento das falhas em um conjunto de máquinas CNC, objetivando proporcionar dados consistentes para a escolha das melhores políticas de manutenção a serem aplicadas nestes equipamentos. O estudo de caso apresentado procura evidenciar os benefícios que um estudo de confiabilidade pode proporcionar no direcionamento das melhores práticas de manutenção para os equipamentos estudados e os resultados destas práticas.

4. ESTUDO DE CASO

Este estudo de caso pretende mostrar como o estudo de confiabilidade de máquinas pode determinar a escolha da política de manutenção a ser adotada. O estudo mostra a aplicação dos conceitos até aqui apresentados de modo a otimizar as ações de manutenção para um conjunto de máquinas de usinagem CNC. O estudo procura mostrar, ainda, como a interação cliente-fornecedor pode trazer benefícios para ambos.

4.1. UNIVERSO DO ESTUDO

Este estudo foi baseado em um conjunto de 62 centros de usinagem CNC fabricados entre o final de 2002 e começo de 2003 para um cliente específico por uma empresa produtora de máquinas - ferramenta destinadas à fabricação de peças para motores. Todas estas máquinas estão alojadas em uma mesma planta, submetidas às mesmas condições de instalação e uso, e recebem os mesmos cuidados de conservação.

Todas estas máquinas representam uma evolução de equipamentos fabricados anteriormente, diferindo de seus similares antecessores por evoluções nos sistemas de porta automática, trocadores de ferramenta, indexadores, sistemas de fusos de esfera e outros itens que foram melhorados a partir da confiabilidade apresentada em versões anteriores, quer em itens de fabricação do próprio fabricante da máquina, como também em itens adquiridos de terceiros.

4.2. PERÍODO DO ESTUDO

O estudo foi iniciado em novembro de 2002, com o desenvolvimento do projeto e se estendeu até o final de agosto de 2004, quando se encerrou a coleta dos dados de falhas destas máquinas já em operação. Quanto à coleta dos dados

de falhas e acompanhamento dos índices de confiabilidade em campo, o estudo foi iniciado a partir da instalação destas máquinas na planta do cliente, em meados do segundo semestre de 2003, e estão aqui sendo apresentados os resultados até o final de agosto de 2004.

4.3. METODOLOGIA APLICADA

Este estudo de caso consiste na confrontação de dados colhidos em duas pesquisas distintas. A primeira é uma “pesquisa indireta documental”, como definido por Lakatos & Marconi (1991), realizada no banco de dados de falhas registradas pelo fabricante, a partir de ações de assistência técnica. Esta pesquisa compreende a análise de todos os dados de falhas, coletados pelo fabricante durante o período de garantia de 1 ano, de todo o universo de máquinas fabricadas, de três modelos distintos. A segunda corresponde a uma pesquisa realizada com “observação direta intensiva e participativa”, como também definida por Lakatos & Marconi (1991), tendo como alvo o universo de máquinas citadas no item 4.1.

O universo dos modelos anteriores ao atual corresponde a um total de 1086 máquinas. Todos os dados de assistência técnica destas máquinas foram registrados pelo fabricante em arquivos eletrônicos, com codificação para itens, conjuntos, tipos de falhas e soluções adotadas. Este registro eletrônico codificado possibilitou o resgate dos dados e sua separação e classificação por item, conjunto, tipos de falhas e soluções implementadas. No total, foram analisados aproximadamente 14.000 registros de falhas, sendo 2.400 registros dos modos de falha estudados, durante o período de garantia.

Para a observação, apontamento e análise de todos os dados e informações referentes ao desenvolvimento, aplicação, testes e funcionamento destas novas máquinas, o autor, funcionário do Departamento de Serviço Pós-Venda do fabricante das máquinas, esteve envolvido em todas as fases citadas, acompanhando o cliente e o fornecedor neste processo.

O autor teve acesso ao projeto, desde sua definição, dentro das dependências do fabricante, até o acompanhamento do uso das máquinas, dentro das dependências do cliente. O autor acompanhou as máquinas na planta do cliente por 12 meses, cuidando do processo de serviço pós-venda dos equipamentos, dando suporte ao cliente nas ações de manutenção para estas máquinas.

O apontamento das falhas destas novas máquinas foi feito pelo próprio autor, dentro das dependências do cliente, diretamente na máquina em estado de falha e acompanhando a solução. As falhas não presenciadas pelo autor foram a ele comunicadas pela equipe de manutenção do cliente e registradas pelo autor em um arquivo eletrônico. Nenhuma falha deixou de ser apontada. A mesma codificação de itens, conjuntos, falhas e soluções utilizada no universo anterior foi, também, aplicada no apontamento, separação e classificação das falhas deste novo universo.

O banco de dados de falhas do fabricante, relativo a equipamentos similares aos objetos de estudo, foi utilizado para análise dos pontos de melhoria a serem aplicados no novo projeto. A partir deste banco de dados, pôde-se identificar os conjuntos que deveriam ter sua confiabilidade melhorada em razão da quantidade de falhas, custo de reparo e do conjunto e importância do conjunto no processo operacional do equipamento.

Os processos de usinagem que cada equipamento adquirido deveria desenvolver e sua importância na linha de produção do cliente também foram analisados para identificação dos equipamentos críticos do processo de produção. A partir desta análise e do estudo de confiabilidade das máquinas, desenvolvido a partir do histórico de falhas apresentado pelo banco de dados do fornecedor, determinou-se as políticas de manutenção para cada equipamento e seus conjuntos.

A partir da instalação dos equipamentos no cliente, as políticas de manutenção escolhidas foram implementadas e todos os dados de falhas apontados foram tabulados em uma planilha no aplicativo *Excel* e transportados para o *software*

Minitab®, para a geração dos índices de confiabilidade reais. Para cada dado de falha, foram apontados as datas e horários de início e fim da intervenção, identificação da máquina, peças substituídas e/ou reparadas, razão, causa e a solução da intervenção.

Os índices reais foram acompanhados e comparados com os índices apresentados pelos equipamentos similares anteriores, para os devidos ajustes das políticas definidas e para a identificação da eficácia das melhorias e demais estudos empregados no processo. As conclusões deste estudo também estão baseadas nos resultados práticos apresentados pelos equipamentos acompanhados.

4.4. OS ESTUDOS NO FORNECEDOR E AS MUDANÇAS NO PROJETO

Como os equipamentos fornecidos constituem uma nova versão desenvolvida inicialmente para este cliente, não existe histórico de falhas para esta nova versão. Desta forma, foram estudadas versões similares anteriores como ponto de partida para alterações de projeto e definição das políticas de manutenção para a nova versão.

Como citado, o estudo foi baseado no banco de dados do fornecedor, que reúne os dados de falhas de todas as máquinas já fornecidas. Para a apresentação deste estudo, o modelo do centro de usinagem fornecido ao cliente será chamado de A0. Do banco de dados do fornecedor, foram extraídos os dados de equipamentos similares aos modelos A0. Foram escolhidos os modelos A3, A2 e A1, antecessores a A0 para seu estudo, sendo A3 o modelo mais antigo, lançado em meados de 1993, e A1 o modelo imediatamente anterior a A0, lançado em meados de 1999. A2 foi lançado em janeiro de 1997.

Os dados foram previamente analisados, de modo a descartar as falhas ocorridas fora de garantia, uma vez que neste período é comum os clientes não solicitarem a presença do fornecedor. Foram consideradas todas as falhas,

apontando-se o tempo entre as falhas. O tempo entre a última falha ocorrida em garantia e o final da garantia foi considerado como censura. Todas as máquinas, portanto, possuem um período de censura compreendido entre a última falha apontada em garantia e o final da garantia.

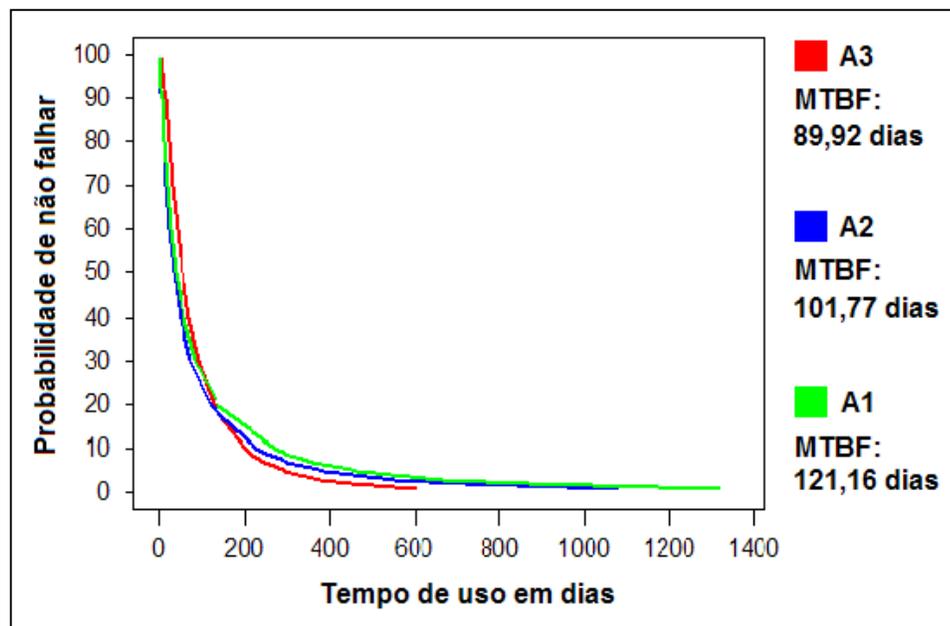
A massa de dados possibilitou verificar o índice de confiabilidade e a curva da função sobrevivência dos modelos A1, A2 e A3. Neste momento, objetiva-se verificar o comportamento das falhas de cada equipamento como um sistema único o que possibilita prever o comportamento das falhas do equipamento A0 também como um sistema único, sem se importar, neste momento com o modo de falha. Os dados foram inseridos no *software* Minitab e os resultados são apresentados na Figura 3.

Fonte: Base de dados do fabricante – *Software* Minitab®

Figura 3 – Curva da função sobrevivência e MTBF para Modelos A3, A2 e A1

A Figura 3 mostra que o modelo mais antigo entre os analisados, A3, tem um MTBF de 89,91 dias e pouca probabilidade de não falhar nos primeiros meses de uso. O modelo A2 mostra um valor de MTBF superior a A3. Este valor de MTBF é, aproximadamente, 13,2% superior ao valor de A3. A curva da função

sobrevivência, entretanto, segue o mesmo padrão apresentado pela curva de sobrevivência de A3, com queda significativa na probabilidade de sobrevivência nos primeiros meses de uso.

Observa-se, também, nova evolução do valor de MTBF para o modelo A1 em relação aos modelos anteriores. O MTBF do modelo A1 é 19,0% superior ao valor apresentado por A2 e 34,7% superior ao valor apresentado por A3. A curva da função sobrevivência continua semelhante a curva apresentada pelos modelos anteriores.

Os valores de MTBF apresentados pelos modelos A1, A2 e A3 mostram uma evolução do MTBF do equipamento nesta linha de máquina, quando analisado como um sistema. Espera-se que as melhorias aplicadas à linha para o novo modelo A0 proporcionem uma melhoria na confiabilidade final deste equipamento, seguindo a tendência de melhoria apresentada nos modelos anteriores.

Pode-se perceber, ainda, pelos gráficos de probabilidade de falhas da Figura 3 e pelos dados da Tabela 1 que, em todos os modelos apresentados, tem-se uma forte redução da probabilidade de sobrevivência nos primeiros meses de vida, chegando a valores inferiores a 50% em 60 dias. Isto demonstra a necessidade de um trabalho específico de verificação geral da máquina quando de sua instalação, na busca de falhas prematuras.

Tabela 1 – Probabilidades de sobrevivência dos modelos estudados para vários tempos de uso (em %)

	Tempo de uso em dias							
Modelo	**1**	**10**	**30**	**60**	**90**	**120**	**180**	**360**
A3	100,00	93,92	69,47	44,19	29,82	21,14	11,80	3,29
A2	99,02	78,78	52,62	34,58	25,23	19,51	12,93	5,53
A1	99,11	80,63	55,82	37,97	28,39	22,39	15,29	6,99

Fonte: Bases de dados do cliente e do fabricante – Software Minitab

Para que se pudesse definir efetivamente as políticas de manutenção do novo equipamento, foi desenvolvida, ainda, uma análise dos conjuntos mais críticos do equipamento e seus modos de falha. Os conjuntos de maior incidência de falhas e de maior importância do modelo A1, mais próximo tecnologicamente de A0, foram identificados na base de dados do fornecedor para promover as melhorias necessárias para aumento da confiabilidade. Um gráfico comparativo entre cada conjunto escolhido, mostrando a incidência de falhas, é apresentado na Figura 4.

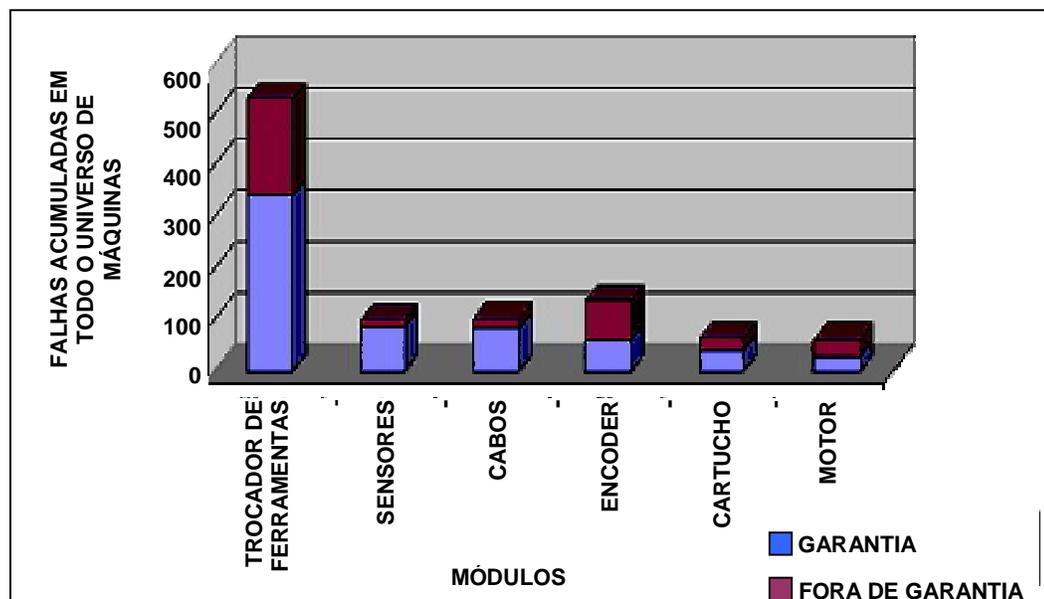
Os conjuntos identificados foram: trocador de ferramentas, sensores, cabos com movimento na área de trabalho, *encoder* do eixo árvore (sistema de medição de velocidade e posição), cartucho do eixo árvore e motor do eixo árvore, mostrando que a maior quantidade de falhas encontra-se no trocador de ferramentas e no conjunto do eixo árvore.

Fonte: Bases de dados do fabricante

Figura 4 – Conjuntos que mais falham no Modelo A1

Os dados dos conjuntos identificados também foram lançados no *software* Minitab® para cálculo de confiabilidade, buscando verificar a curva de

probabilidade de sobrevivência de cada item no modo de falha relevante. Assim como definido para os cálculos de confiabilidade de cada modelo de máquina, os cálculos de confiabilidade de cada um destes itens escolhidos também foram feitos tomando-se os tempos entre as falhas do modo de falha relevante e considerando como censura o tempo entre a última falha e o final da garantia.

Os resultados dos cálculos são apresentados nas Figuras 5, 6, 7, 8, 9 e 10 na forma de MTBF (em dias). São apresentadas, também, nestas mesmas figuras, as curvas de sobrevivência para cada conjunto isoladamente. Uma análise comparativa entre as curvas de sobrevivência de cada conjunto é mostrada posteriormente no item 4.5 para a escolha da política de manutenção de cada um deles.

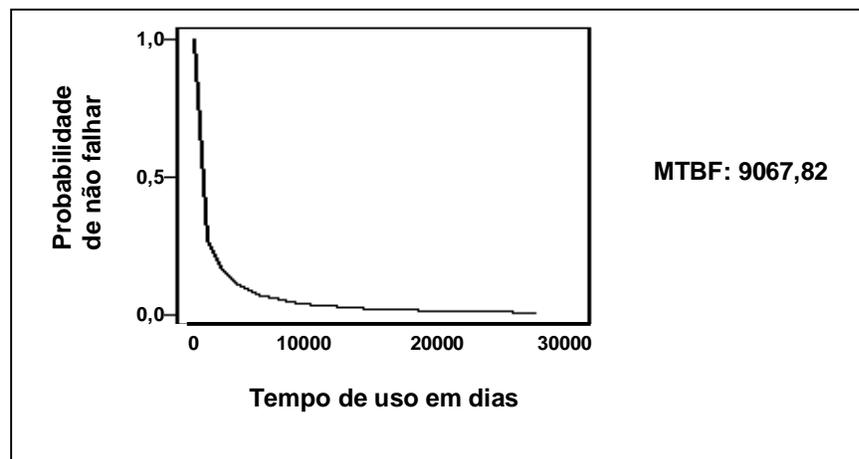
O trocador de ferramentas possui vários modos de falha, entretanto apenas um deles predomina em 69% das paradas no trocador de ferramentas e é analisado neste estudo. Este modo de falha diz respeito a desajustes do conjunto devido ao desgaste natural dos elementos mecânicos, particularmente de freios, roldanas e garras. Considera-se que as intervenções de reajuste repõem o item em sua condição de novo (*as good as new*).

Fonte: Base de dados do fabricante – *Software* Minitab®

Figura 5 – Curva da função sobrevivência e MTBF para o trocador de ferramentas

.

A Figura 3 mostra que o modelo mais antigo entre os analisados, A3, tem um MTBF de 89,91 dias e pouca probabilidade de não falhar nos primeiros meses de uso. O modelo A2 mostra um valor de MTBF superior a A3. Este valor de MTBF é, aproximadamente, 13,2% superior ao valor de A3. A curva da função sobrevivência, entretanto, segue o mesmo padrão apresentado pela curva de sobrevivência de A3, com queda significativa na probabilidade de sobrevivência nos primeiros meses de uso.

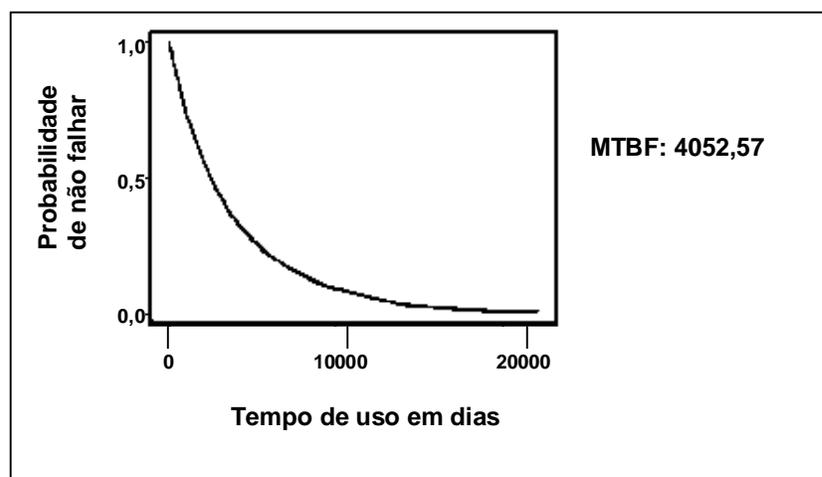
Os sensores possuem apenas um modo de falha relevante que corresponde a desajustes provocados por falha em sua fixação. As falhas de fixação são normalmente provocadas por vibração inerente ao uso dos sistemas que utilizam os sensores e requerem novo ajuste a cada falha. Neste caso também considera-se que o reajuste do sensor traz ao item uma condição de novo (*as good as new*). A função sobrevivência indicada para os sensores, neste modo de falha, está na Figura 6 que mostra uma queda menos acentuada na probabilidade de sobrevivência ao longo do primeiro ano de vida dos sensores em relação ao trocador de ferramentas. Para os sensores, os cálculos indicam uma probabilidade de sobrevivência de 98% nos primeiros 30 dias, 92% após seis meses e 87% após um ano.

Fonte: Base de dados do fabricante – *Software* Minitab®

Figura 6 – Curva da função sobrevivência e MTBF para os sensores

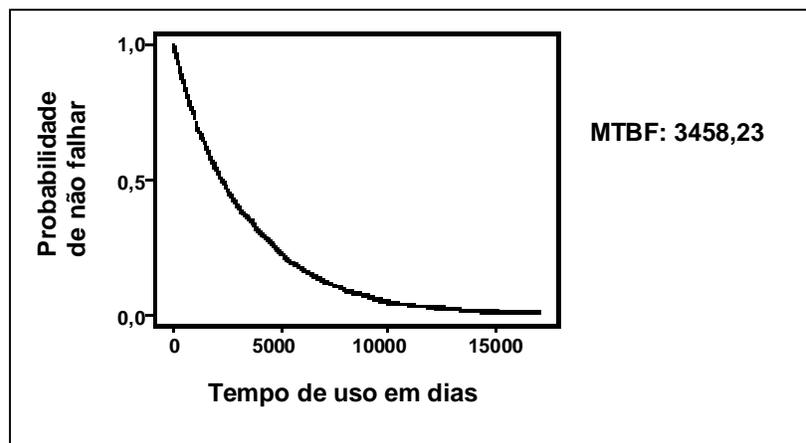
As falhas apresentadas pelos cabos também apresentam um único modo de falha relevante que corresponde aos danos causados por óleo, cavacos e sujeira depositados nas calhas e condutores dos cabos e sempre requer a substituição dos cabos. A forma de evitar a falha consiste na manutenção periódica das esteiras porta-cabos. A Figura 7 mostra a curva de sobrevivência deste item, no modo de falha explicitado, que tem uma distribuição parecida com a dos sensores, com poucas falhas no primeiro ano. Para os cabos, a probabilidade de sobrevivência no primeiro mês é de 98%, 93% nos primeiros 6 meses e chega a 88% ao final do primeiro ano.

Fonte: Base de dados do fabricante – *Software* Minitab

Figura 7 – Curva da função sobrevivência e MTBF para os cabos

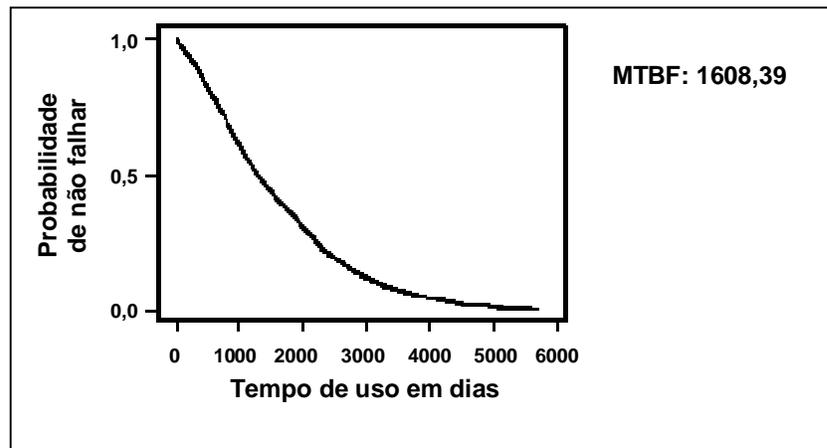
O modo de falha apresentado pelo *encoder* é único e sempre requer sua substituição. Trata-se de danos internos causados por vibração proveniente do cabeçote, do sistema de transmissão ou do motor do eixo árvore. Apenas a identificação da vibração e de sua origem e a correção do problema podem evitar a falha. A Figura 8 mostra que a queda na probabilidade de sobrevivência do *encoder* é ainda menos acentuada que os cabos ou sensores. Neste caso, a probabilidade de falhas nos primeiros 30 dias é menor que 1% (0,6%), 94% não apresentam falhas até os primeiros 6 meses e apenas 13% falham no primeiro ano.

Fonte: Base de dados do fabricante – *Software* Minitab®

Figura 8 – Curva da função sobrevivência e MTBF para o *encoder*

A Figura 9 mostra a distribuição de falhas de cartuchos. Aqui o modo de falha relevante refere-se aos danos provocados nos rolamentos, causados por colisões e também por penetração de óleo solúvel nos mesmos, exigindo a substituição do cartucho. A falha pode ser prevista através do uso de manutenção preditiva por medições de vibração.

Este item tem uma particularidade importante: os clientes sempre chamam o fabricante quando ocorre este modo de falha, mesmo fora de garantia, uma vez que a substituição dos rolamentos requer mão-de-obra e condições diferenciadas. Esta particularidade permitiu ao autor considerar todo o histórico de falhas deste item, mesmo fora de garantia, o que aumenta bastante a base de dados de falhas.

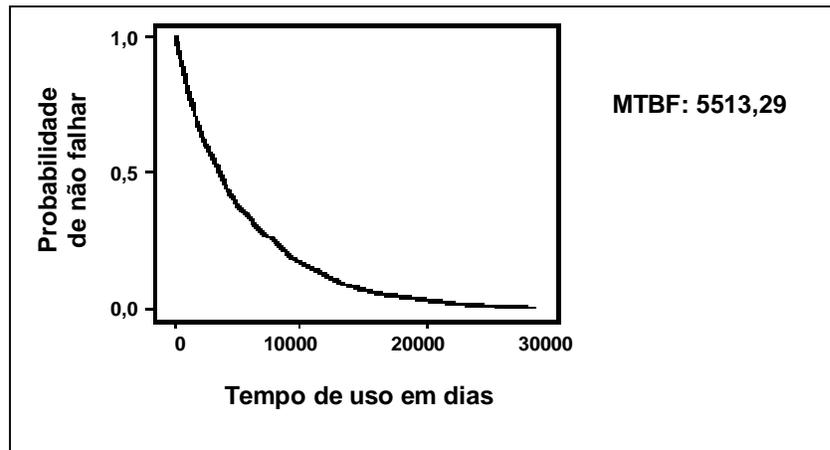
O *encoder* apresenta poucas falhas no primeiro ano de vida, chegando a uma probabilidade de sobrevivência de 91% ao final do período. O item passa a apresentar redução significativa em sua probabilidade de vida ao final do terceiro ano, com 88%, e 82% ao final do quarto ano. A queda na probabilidade de sobrevivência cai muito no quinto ano, chegando a 46% de probabilidade de falha.

Fonte: Base de dados do fabricante – *Software* Minitab®

Figura 9 – Curva da função sobrevivência e MTBF para o cartucho

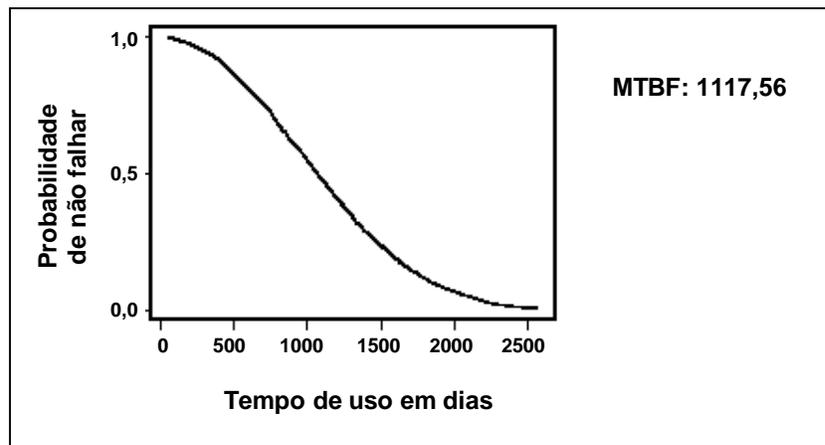
O modo de falha relevante nos motores do eixo árvore constitui-se em danos nos rolamentos dos mancais, causados por vibração, que sempre requerem a substituição do motor e que também podem ser previstas através da medição da vibração. O motor apresenta uma queda acentuada na probabilidade de sobrevivência, por este modo de falha, a partir de 500 dias de uso, como mostra a Figura 10. Com 500 dias de uso, a probabilidade de vida é de 87%, tendo a maior concentração de falhas por volta de 1000 dias de uso, com apenas 54% de probabilidade de sobrevivência.

Fonte: Base de dados do fabricante – *Software* Minitab

Figura 10 – Curva da função sobrevivência e MTBF para o motor

O fabricante decidiu implementar alterações nos projetos de modo a buscar uma confiabilidade maior nos conjuntos apresentados e, consequentemente, no equipamento como um todo. Estes conjuntos sofreram as alterações descritas sucintamente a seguir, e ainda outras modificações foram implementadas no novo projeto para A0.

Os novos equipamentos foram testados no fornecedor, procurando identificar possíveis problemas de origem e reduzir as falhas prematuras (mortalidade infantil), observadas em todos os gráficos apresentados, tanto para as modelos A1, A2 e A3, como para os módulos de A1 estudados. Os problemas surgidos foram corrigidos ainda durante a fase de testes.

Quanto ao trocador de ferramentas, o original utilizado no modelo A1 foi substituído por um outro modelo, de fabricação italiana, reconhecido por sua alta confiabilidade e velocidade de troca. Devido ao alto índice de mortalidade infantil apresentado no modelo anterior, com muitas falhas de ajuste mecânico, o fornecedor decidiu incrementar, ainda, um novo suporte para transporte da máquina, que trava mecanicamente o trocador de ferramentas, evitando desajustes mecânicos. Os ajustes mecânicos deveriam ser revistos durante a instalação da máquina. Com isso, pretendeu-se reduzir as falhas no primeiro ano de vida.

Os sensores aos quais o estudo de A1 se referem faziam parte, em sua maioria, do conjunto do trocador de ferramentas. Com a substituição do conjunto, espera-se uma melhora na confiabilidade destes elementos. Neste trocador, estes sensores ficam melhor protegidos e com uma fixação mais eficiente. Apenas um dos sensores não possuía proteção adequada, o que foi providenciado pelo fabricante da máquina. Os sensores da porta de acesso à máquina também receberam uma proteção mais adequada. Quanto aos demais sensores não pertencentes ao trocador de ferramentas e porta, estes não estão na área de usinagem e, historicamente, não apresentam problemas.

Quanto aos cabos, estes receberam grande atenção do fabricante que, no projeto do modelo A0, protegeu os cabos que sofrem movimento ao longo de

todo seu percurso com esteiras porta-cabos mais adequadas, com um dimensionamento que garante seu movimento sem que sejam tensionados ou torcidos, e que garantem sua proteção a cavacos e óleo.

O *encoder* passou por reavaliação e alguns pontos de melhoria foram aplicados em sua montagem, principalmente na melhoria do alinhamento do seu eixo.

Os cartuchos também receberam atenção especial, muito mais pelo custo de sua substituição, que pelo índice de confiabilidade. Todos os cartuchos de eixo árvore foram fornecidos com um sistema de refrigeração a água. Este sistema evita o sobreaquecimento dos rolamentos, evitando que a graxa permanente que os lubrifica seja deteriorada pela temperatura. Este novo sistema já havia sido testado em outros protótipos, mostrando-se eficiente.

O motor AC do eixo árvore da linha A1 foi substituído por um motor de outro fabricante de motores, já conhecido pelo fabricante da máquina como um motor de alta confiabilidade e desempenho. Uma versão anterior deste novo motor já foi utilizada no modelo de máquina A2, com um MTBF de 27.500 dias (25 vezes superior ao MTBF do motor utilizado em A1), com apenas 7 falhas registradas, todas durante a garantia, apresentadas por todo o universo de mais de 500 máquinas do modelo A2.

4.5. A ESCOLHA DAS POLÍTICAS DE MANUTENÇÃO

Os dados apresentados no item anterior mostram a necessidade de uma atenção maior para os conjuntos escolhidos. Mesmo depois das modificações implementadas no projeto, definiu-se que estes itens seriam acompanhados de um plano misto de manutenção preditiva e preventiva baseado nas curvas de sobrevivência apresentadas. Além destas ações, decidiu-se fazer uma aceleração da vida dos equipamentos, fazendo-os operar continuamente por 10 dias após a instalação, antes de entrarem em produção, para evidenciar as falhas prematuras.

Com base em análises dos custos envolvidos na manutenção preventiva e dos custos decorrentes das falhas, quando observadas as distribuições de probabilidade de falhas dos itens estudados, foi definido que as ações preventivas deveriam ser realizadas com uma periodicidade capaz de manter o nível de confiabilidade acima de 90%. Para tal, o estudo de confiabilidade de cada equipamento e de cada modo de falha relevante foi utilizado no cálculo da periodicidade de intervenção. O mesmo estudo foi utilizado na definição das ações preditivas e sua periodicidade em itens onde o modo de falha pode ser evidenciado por ações preditivas. Além destas políticas, outras ações diárias foram definidas para os operadores, de modo a garantir a confiabilidade esperada.

Definiu-se que um "*check list*" de manutenção autônoma deveria ser criado para que os operadores realizassem uma manutenção autônoma diária, a cada mudança de turno. Este "*check list*" deveria consistir, basicamente, de verificações de níveis de óleo das unidades de lubrificação, hidráulica e pneumática, verificação de manômetros dos sistemas hidráulico e pneumático, limpeza de proteções da área de trabalho, limpeza de dispositivos de fixação, verificação de vazamentos, aquecimento e outros.

O plano de manutenção preventiva foi desenvolvido para aqueles itens cujo modo de falha pode ser evitado com ações preventivas, como sensores, cabos e trocador de ferramentas, procurando manter a confiabilidade acima de 90%. Este plano deve ser executado pela equipe de manutenção e consiste em ações de verificação e eventual ação de correção, dentro de uma periodicidade determinada a partir do estudo de confiabilidade de cada item e de seu modo de falha, estudados anteriormente. Para tal, identificou-se quais os tempos de uso de cada item em que suas probabilidades de falha atingem 10% (probabilidade de sobrevivência de 90%).

A Tabela 2 apresenta os tempos de uso destes itens para diversos índices de confiabilidade e, de forma destacada, para R(t) = 90%. A Figura 11 apresenta a parte inicial das curvas de sobrevivência para estes 3 itens e indica nas curvas os tempos de uso para confiabilidade de 90%.

Tabela 2 – Probabilidade de sobrevivência dos itens trocador de ferramentas, sensores e cabos para vários tempos de uso (em %)

PROBABILIDADE DE SOBREV. (%)	TEMPO DE USO EM DIAS		
	TROCADOR	CABOS	SENSORES
99	6,88	25,30	18,20
98	12,29	53,10	40,80
97	17,76	82,20	65,70
96	23,43	112,20	92,20
95	29,36	143,00	120,20
90	63,64	307,40	276,90
80	162,45	682,60	660,70
70	319,27	1123,90	1137,90
60	568,72	1646,60	1725,60
50	975,56	2277,70	2458,00
40	1673,44	3064,50	3396,80
30	2980,90	4096,60	4661,50
20	5858,54	5577,40	6525,90
10	14953,54	8161,90	9884,00

Fonte: Bases de dados do cliente e do fabricante – *Software* Minitab®

Tanto a Tabela 2, como a Figura 11 mostram os tempos de uso para que os itens atinjam uma probabilidade de 90%. Desta forma, as ações de manutenção preventiva para prevenir o modo de falha dos sensores serão a cada 9 meses (270 dias). As ações preventivas no trocador de ferramentas serão a cada 2 meses (60 dias) e as ações preventivas para os cabos terão periodicidade de 10 meses (300 dias).

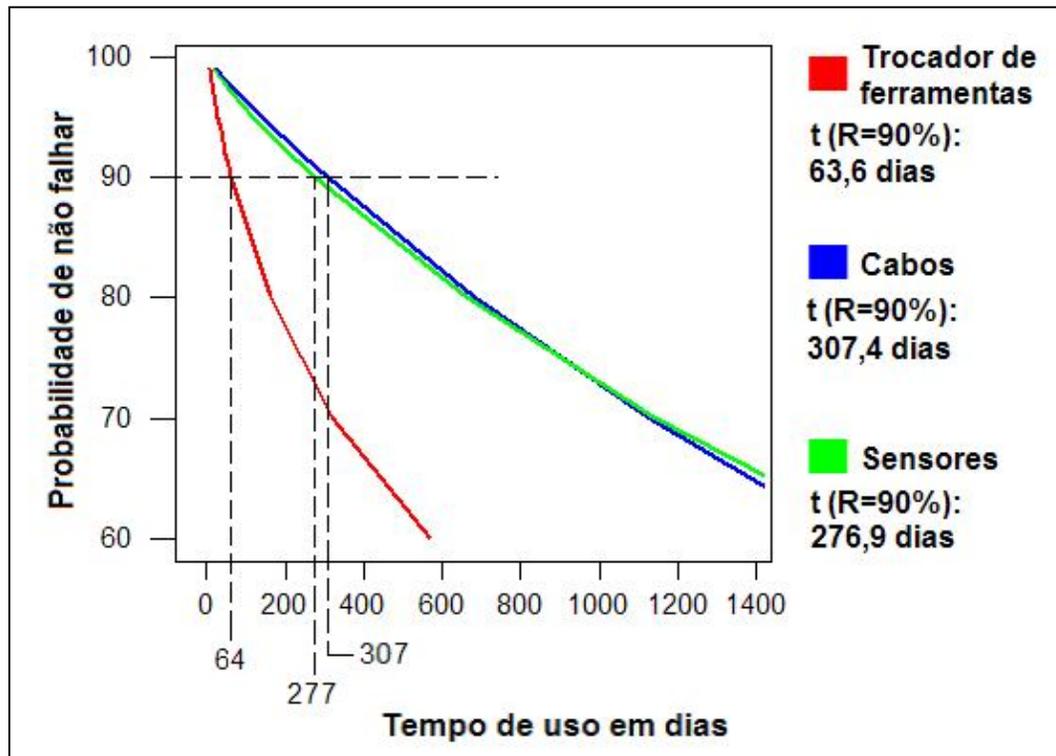
Estas ações devem consistir em verificações das condições destes elementos, limpeza e reajustes, quando necessário. Desta forma, deverão ser evitadas as paradas devidas aos modos de falhas estudados e, ainda, possibilitar o agendamento de intervenções mais demoradas quando for percebida a necessidade destas intervenções.

Fonte: Bases de dados do cliente e do fabricante – *Software* Minitab®

FIGURA 11 – Curvas de probabilidade de sobrevivência do trocador de ferramentas, cabos e sensores

Também foi desenvolvido um plano de ações preditivas que procura prever as falhas nos itens *encoder*, motor e cartucho do eixo árvore, através de medições de vibração. Com isto, pretende-se tornar a falha previsível e assim poder planejar as intervenções fora do horário de produção, procurando eliminar as paradas não programadas devido a falhas nestes itens. Para isso, o estudo de confiabilidade destes itens foi utilizado para definir a periodicidade das medições. Novamente foram analisados os custos da manutenção e da não-manutenção para esta definição.

Devido ao custo destes itens, à dificuldade de obtenção das peças e ao longo tempo de máquina parada que uma falha nestes itens provoca, optou-se por uma periodicidade das medições de vibração equivalente ao tempo de uso do conjunto para o qual sua probabilidade de sobrevivência (não falhar) fique acima de 97% (probabilidade de falha abaixo de 3%). A Tabela 3 mostra as

probabilidades de sobrevivência de cada item para diversos tempos de uso, particularmente para 97%. A Figura 12 mostra o início das curvas de probabilidade de sobrevivência dos três itens e a indicação dos pontos nas curvas para uma probabilidade de 97%, e os dias de uso correspondentes a este valor de probabilidade.

Tabela 3 – Probabilidade de sobrevivência dos itens *encoder*, cartucho e motor para vários tempos de uso (em %)

PROBAB. DE SOBREV. (%)	DIAS DE USO		
	ENCODER	CARTUCHO	MOTOR
99	47,4	32,2	149,8
98	81,8	69,7	207,0
97	112,9	109,9	250,4
96	141,9	152,0	286,7
95	169,7	195,7	318,7
90	298,1	434,3	444,9
80	536,4	996,9	629,9
70	774,3	1675,9	782,7
60	1025,7	2494,7	924,4
50	1302,5	3498,0	1064,9
40	1620,4	4764,8	1211,8
30	2006,6	6447,3	1375,3
20	2518,4	8891,6	1573,2
10	3333,3	13220,2	1857,1

Fonte: Bases de dados do cliente e do fabricante – *Software* Minitab®

Baseado nos valores obtidos para 97% de probabilidade de sobrevivência, adotou-se que a periodicidade de medição de vibração para todo o conjunto seria de 4 meses. Optou-se por unificar a periodicidade de medição para os três itens, mesmo apresentando tempos diferentes nas curvas de sobrevivência, para um período próximo dos tempos menores apresentados pelo cartucho e motor, porque é mais viável operacionalmente e porque a vibração originada em um dos elementos pode provocar a falha nos demais. Os dados obtidos devem ser tabulados para mostrar a tendência destas variáveis no tempo, procurando identificar a curva de deterioração do conjunto.

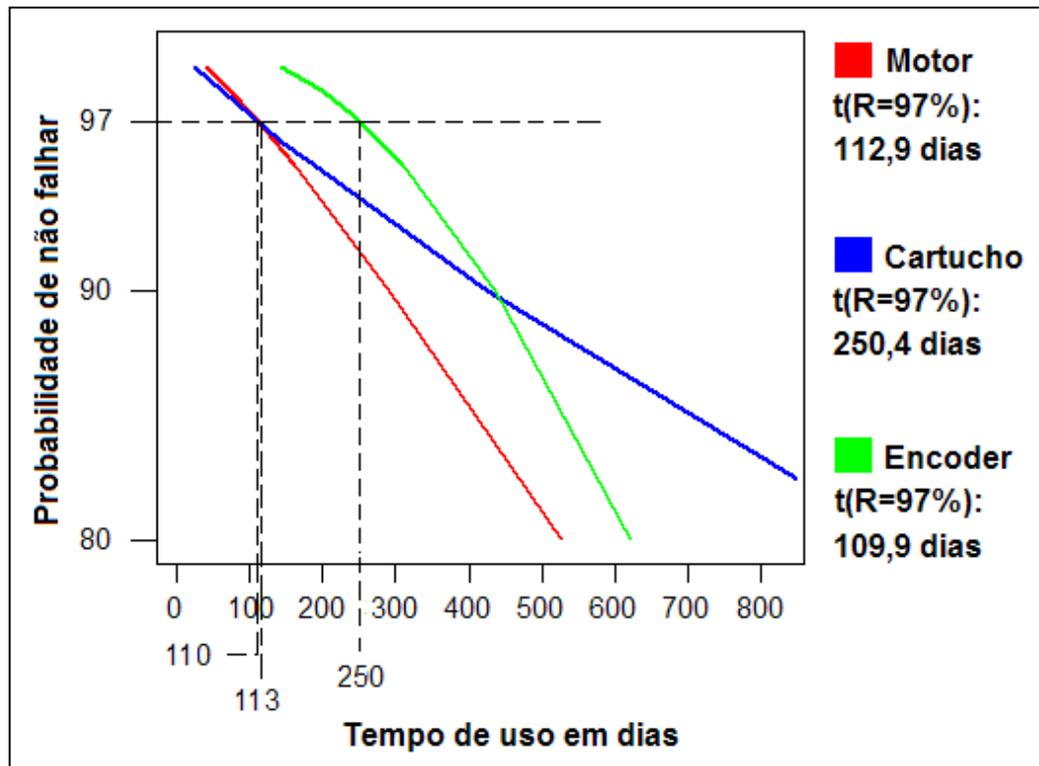
As medições deverão ser feitas por um profissional da equipe da manutenção do cliente, treinado para tal.

Fonte: Bases de dados do cliente e do fabricante – *Software* Minitab®

FIGURA 12 – Curvas de probabilidade de sobrevivência do cartucho, *encoder* e motor

Para as máquinas que executam os processos mais críticos, foram ainda identificados outros itens de verificação que apenas serão estendidos às demais máquinas quando for percebido algum problema nestas máquinas críticas. Trata-se de ações de verificação dos sistemas de porta, sistema hidráulico e de ventilação dos inversores de frequência dos motores que movem os eixos das máquinas.

4.6. A APLICAÇÃO DAS POLÍTICAS E OS RESULTADOS OBTIDOS

Para que as ações surtissem efeito, o fornecedor treinou as equipes de produção e manutenção do cliente. Os operadores foram treinados em cada

item do *check list* criado, de modo a conhecê-los e poder identificar problemas potenciais. Os operadores foram ainda orientados a identificar anormalidades em ruídos, temperaturas e consumo de fluidos. Parte da equipe de manutenção do cliente foi treinada durante a montagem e teste dos equipamentos. Outra parte foi treinada na planta do próprio cliente.

Após a instalação, as máquinas foram colocadas em uso contínuo e acelerado por 10 dias, em vazio, de modo a evidenciar as falhas prematuras. As falhas ocorridas foram corrigidas e registradas de modo a compor os cálculos finais de MTBF destes equipamentos. Os planos preventivos e preditivos definidos em função das análises das curvas de sobrevivência dos itens estudados foram colocados em prática, segundo a periodicidade definida.

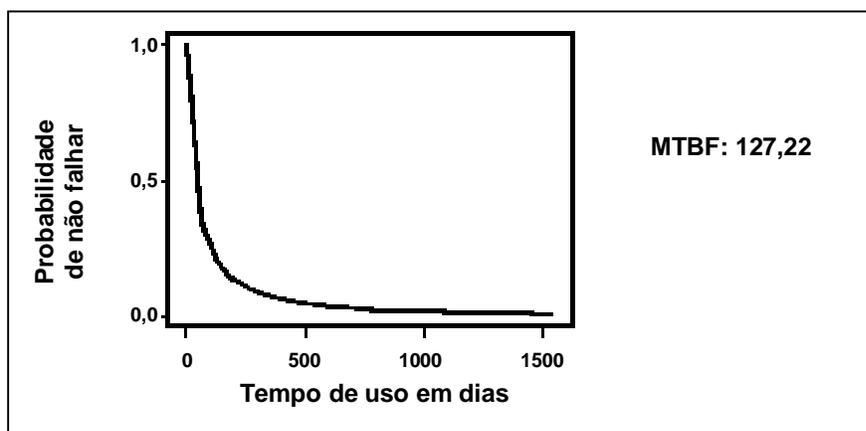
A execução e o apontamento das ações de manutenção foram acompanhados pelo fabricante, de modo a verificar a confiabilidade apresentada pelos equipamentos. As falhas apresentadas durante o acompanhamento ainda não permitem um cálculo consistente da confiabilidade dos módulos acompanhados. Permitem, entretanto, um cálculo prévio da confiabilidade do modelo A0, a partir das falhas já apontadas, com o mesmo critério de apontamento de tempos de falha e censura empregados nos modelos anteriores. A Figura 13 apresenta a curva da função sobrevivência para este modelo, bem como o MTBF apresentado.

Fonte: Base de dados do usuário – *Software* Minitab®

Figura 13 – Curva da função sobrevivência e MTBF para o Modelo A0

Percebe-se que o modelo A0 apresenta uma curva da função sobrevivência parecida com as curvas apresentadas por seus antecessores similares. O modelo apresenta, também, um MTBF próximo do modelo A1, predecessor de A0. A Tabela 4, complementando a Tabela 1, permite visualizar, de forma comparativa, a probabilidade de sobrevivência de A0 em relação aos modelos anteriores. A Figura 14 mostra as curvas de sobrevivência de todos os modelos de máquinas estudados.

Tabela 4 – Probabilidade de sobrevivência de A0 até um ano de uso (em %)

	TEMPO DE USO EM DIAS							
Modelo	**1**	**10**	**30**	**60**	**90**	**120**	**180**	**360**
A3	100,00	93,92	69,47	44,19	29,82	21,14	11,80	3,29
A2	99,02	78,78	52,62	34,58	25,23	19,51	12,93	5,53
A1	99,11	80,63	55,82	37,97	28,39	22,39	15,29	6,99
A0	97,95	74,98	50,79	34,73	26,30	21,03	14,76	7,23

Fonte: Bases de dados do cliente e do fabricante – *Software* Minitab®

Apesar de indicar um MTBF ligeiramente superior em relação aos modelos anteriores, o estudo indica um aumento da mortalidade infantil nos primeiros meses, com melhora dos índices ao final do primeiro ano. Esta mortalidade infantil, particularmente de itens não apontados neste estudo, pode estar ligada à aceleração do uso, que ocorreu após a instalação das máquinas. Percebe-se, também, uma desaceleração na queda dos índices de sobrevivência de A0, em relação ao modelos anteriores, após o primeiro mês de uso. Esta desaceleração permite índices melhores de sobrevivência após 1 ano de vida.

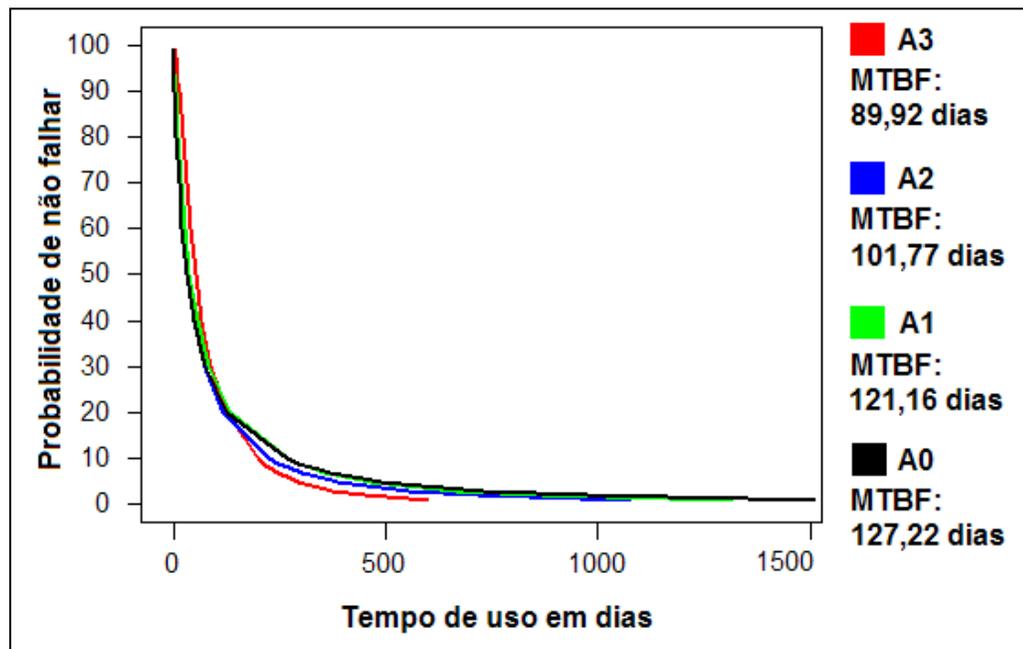
Quanto aos itens estudados, foram apontadas poucas falhas destes itens nos modos de falha estudados, inviabilizando o estudo de confiabilidade devido ao grande número de censuras em comparação com o pequeno número de falhas. Não foram observadas falhas em cabos, *encoders* e motores durante o período estudado.

Fonte: Bases de dados do cliente e do fabricante – *Software* Minitab

FIGURA 14 – Curvas de probabilidade de sobrevivência e MTBF dos modelos A3, A2, A1 e A0

As ações preventivas permitiram evitar falhas, principalmente no trocador de ferramentas, uma vez que possibilitaram reajustar elementos mecânicos do trocador antes que a falha ocorresse. Entretanto, estas ações preventivas não evitaram algumas falhas devido a desajuste de sensores ocorridos entre uma verificação e outra. Uma análise deverá ser feita para verificar se há a necessidade de rever a periodicidade ou de se tomar alguma outra ação.

As medições de vibração (foram feitas 3 no período estudado) mostraram que um dos equipamentos apresenta uma vibração no cabeçote acima do nível apresentado pelos demais, ainda dentro dos limites, e que não apresentou elevação deste nível nas medições realizadas. Esta máquina, em particular, está sendo observada com periodicidade menor. Espera-se poder prever o melhor momento para a intervenção antes que a falha ocorra.

5. CONCLUSÕES E SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

Este trabalho mostra como os conceitos de confiabilidade podem ser aplicados na definição das ações de manutenção. Independentemente do resultado das ações de manutenção definidas, o estudo aqui apresentado mostrou que uma abordagem mais científica dos dados de falha pode ajudar os planejadores de manutenção a escolher políticas de manutenção mais direcionadas a cada componente, evitando a parada do equipamento e, principalmente, a parada dos processos produtivos que dependem destes equipamentos.

O estudo mostrou apenas parte do que os dados de falha podem apresentar quando devidamente estudados sob a óptica estatística dos conceitos de confiabilidade. Muitos outros estudos podem ser feitos utilizando estes conceitos na busca da identificação, por exemplo, do melhor momento para se fazer uma reforma ou o descarte de um equipamento, definição da necessidade de contratação de mão-de-obra, compra de sobressalentes, ou mesmo para identificar os itens que merecem uma revisão de projeto, entre outras aplicações.

O trabalho mostrou, ainda, reforçado pelos gráficos apresentados no estudo de caso, que o uso destes conceitos exige uma mão-de-obra que domine a matemática envolvida ou, ao menos, que saiba interpretar os gráficos envolvidos. O uso de *softwares* especializados também deve ser ressaltado como uma necessidade neste contexto devido à complexidade dos cálculos envolvidos, facilitando a geração dos gráficos e dos índices desejados.

É de suma importância, ainda, que as bases de dados de sustentação dos estudos de confiabilidade estejam adequadamente organizadas. A estrutura da manutenção deve estar organizada de modo a colher, apontar e armazenar adequadamente os dados. Estudos de confiabilidade podem não indicar as melhores ações de manutenção quando os dados não são confiáveis.

Outro ponto a ressaltar é que o estudo de confiabilidade, quando aplicado à função manutenção, apenas direciona as ações, não sendo uma política de manutenção em si mesmo. É, em síntese, uma técnica complementar, capaz de proporcionar aos gerentes de manutenção dados para a tomada de decisões quanto ao rumo a ser tomado nas ações de manutenção, na busca de melhor equilíbrio entre os custos de manutenção e a disponibilidade dos equipamentos, face à importância de cada equipamento dentro do processo produtivo.

A cooperação cliente - fornecedor mostra-se como um fator facilitador neste processo de análise de confiabilidade de equipamentos, especialmente quando o cliente não possui histórico relevante dos equipamentos sob estudo. A cooperação permite a troca de informações que possibilita ao cliente uma escolha adequada das políticas de manutenção e permite ao fornecedor receber informações confiáveis sobre as falhas nos equipamentos, possibilitando a melhoria do produto.

Este trabalho abre margem para estudos mais aprofundados nesta mesma linha. O trabalho aqui apresentado mostra como as bases de dados do fabricante ajudaram o cliente a escolher as políticas de manutenção para os equipamentos em estudo. Um trabalho futuro poderia estudar como os dados de falha deste cliente poderiam auxiliar o fornecedor na melhoria contínua dos equipamentos. Ainda, de que forma os dados colhidos pelo cliente, em sua realidade de condições de uso e instalação, poderiam ser aproveitados pelo fornecedor para o desenvolvimento de um equipamento genérico para todo seu universo de clientes, nas mais variadas condições de uso e instalação.

Outro estudo importante poderia mostrar de forma detalhada a relação entre os custos da manutenção, os custos de máquina parada e a periodicidade de intervenções definidas através do estudo de confiabilidade dos equipamentos. No estudo apresentado, definiu-se esta periodicidade baseando-se nas curvas de sobrevivência e nos custos e riscos envolvidos, porém, a metodologia desta análise não foi explicitada, o que poderia compor um novo trabalho.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ASHOK, S.; SANTHAKUMAR, A R. NLP to promote TQM for effective implementation of ISO 9000, *Managerial Auditing Journal*, v. 17, n. 5, 2002, pp. 261-265.

BADÍA, F.G.; BERRADE, M. D.; CAMPOS, C. A. Optimal inspection and preventive maintenance of units with revealed and unrevealed failures, *Reliability Engineering System Safety*, n. 78, 2002, pp. 157-163.

BAMBER, C. J.; SHARP, J. M.; HIDES, M. T. Developing management systems towards integrated manufacturing: a case study perspective, *Integrated Manufacturing Systems*, v.11, n. 7, 2000, pp. 454-461.

BEN-DAYA, Mohamed. The economic production lot-sizing problem with imperfect production process and imperfect maintenance, *International Journal of Production Economics*, n. 76, 2001, pp. 257-264.

BEN-DAYA, Mohamed. You may need RCM to enhance TPM implementation, *Journal of Quality in Maintenance*, v. 6, n. 2, 2000, pp. 82-85.

CABRITA, Georges. Em entrevista concedida a José Trindade Célis e Hkátia Schafer, apresentada no artigo A Manutenção Na Indústria Automotiva*, Revista Manutenção*, março/maio, n. 86, 2002, pp. 20-26.

CASTRO, David Aguiar de. Implementando e Praticando Confiabilidade na Manutenção. Anais do *12º.º Congresso Brasileiro de Manutenção ABRAMAN*, 20-24 de outubro, São Paulo, 1997, pp.1-13

CATTINI, Orlando. *Derrubando os Mitos da Manutenção,* São Paulo: Ed. STS Publicações e Serviços Ltda., 1992, 123 p.

CAVALCANTE, C.A.V.; FERREIRA, R.J.P.; FERREIRA, H. L.; ALMEIDA, A .T. Sistema de Apoio à Decisão para o estabelecimento de política de manutenção

preventiva. in anais do *XXIII Encontro Nacional de Engenharia de Produção*, Ouro Preto, 21 a 24 de outubro de 2003, CD ROM, 7 p.

CHIU, H-N.; HUANG, B.S. The economic design of x control charts under a preventive maintenance policy, *International Journal of Quality & Reliability Management*, v. 13, n. 1, 1996, pp. 61-71.

COOKE, F. L. Implementing TPM in plant maintenance: some organizational barriers, *International Journal of Quality & Reliability Management*, v. 17, n. 9, 2000, pp. 1003-1016.

DESHPANDE, V.S.; MODAK, J.P. Aplication of RCM to a medium scale industry, *Reliability Engineering & System Safety*, n. 77, 2001, pp. 31-43.

DHILLON, B. S. *Engineering Maintenance: A Modern Approach*, Flórida – USA: CRC Press, 2002, 224 p.

DHILLON, B. S.; FASHANDI, A. R. M. Stochastic analysis of a robot machine with duplicate safety units. *Journal of Quality in Maintenance Engineering*. v. 5, n. 2, 1999, pp. 114-127.

DHILLON, B. S.; YANG, N. Reliability analysis of a repairable robot system. *Journal of Quality in Maintenance Engineering*. v. 2, n. 2, 1996, pp. 30-37.

DHILLON, B. S.; YANG, N. Probabilistic analysis of a maintainable system with human error. *Journal of Quality in Maintenance Engineering*. v. 1, n. 2, 1995, pp. 50-59.

DOHI, T.; OKAMURA, H.; OSAKI, S. Optimal control of preventive maintenance schedule and safety stocks in an unreliable manufacturing enviroment, *International Journal of Production Economics*, n. 74, 2001, pp. 147-155.

DÜPOW, H.; BLOUNT, G. A review of reliability prediction. *Aircraft Engineering and Aerospace Technology*. v. 69, n. 4, 1997, pp. 356-362.

FARIA, J. G. de Aguiar. *Administração da Manutenção: Sistema P.I.S*. São Paulo: Ed. Edgar Blucher Ltda, 1994, 112 p.

FERRARI, E.; PARESCHI, A; PERSONA, A; REGATTIERI, A . TPM: situation and procedure for a soft introduction in Italian factories, *The TQM Magazine*, v. 14, n. 6, 2002, pp. 350-358.

FLEMING, P.V.; FRANÇA, S.R.R.O. Considerações sobre a implementação conjunta de TPM e MCC na indústria de processos, in anais do *12º. Congresso Brasileiro de Manutenção, ABRAMAN – Associação Brasileira de Manutenção,* 20 a 24 de Outubro de 1997, São Paulo – SP, CD-ROM, 2 p.

GARBATOV, Y.; SOARES, C.G. Cost and reliability based atrategies for fatigue maintenance planning of floating structures, *Reliability Engineering & System Safety*, n. 73, 2001, pp. 293-301.

GOPALAN, M. N.; KUMAR, U. D. Analysis of an n-unit cold-standby system with general failure and repair time distributions. *International Journal of Quality & Reliability Management*. v. 12, n. 3, 1995, pp. 77-85.

GRAVES, S.B.; MURPHY, D.C.; RINGUEST, J.L. Acceptance Sampling Versus Redundancy as Alternative Means to Achieving Goals for System Reliability. *International Journal of Quality & Reliability Management*, v. 16, n. 4, 1999, pp. 362-370.

HANSON, J.; BACKLUND, F.; LYCKE, L. Managing commitment: increasing the odds for successful implementation of TQM, TPM or RCM, *International Journal of Quality & Reliability Management*, v. 20, n. 9, 2003, pp. 993-1008.

HARTMANN, E.H. *Succesfully Installing TPM in a Non-Japanese Plant*, Pittsburgh, USA: TPM Press, Inc., 1992, 219 p.

HASTINGS, N. A. J.; ANG, J. Y. T. developments in computer-based reliability analysis. *Journal of Quality in Maintenance Engineering*. v. 1, n. 1, 1995, pp. 69-78.

HIRANO, Hiroyuki. *5S na Prática*, São Paulo: Instituto IMAM, 1994, 199 p.

JINGLUN, Z.; QUAN, S. Reliability analysis based on binary decision diagrams. *Journal of Quality in Maintenance Engineering*. v. 4, n. 2, 1998, pp 150-161.

JOHNSON, R.W.; WANG, V.; PALMER, M. Thermal cycle reliability of solder joints to alternate plating finishes. *Circuit World*, n. 25/2, 1999, pp. 27-30.

KARDEC, A.; LAFRAIA, J. R. *Gestão Estratégica e Confiabilidade*, Rio de Janeiro: Qualitymark: ABRAMAN, 2002, 112 p.

KARDEC, A; NASCIF, J.A; BARONI, T. *Gestão Estratégica e Técnicas Preditivas,* Rio de Janeiro: Qualitymark: ABRAMAN, 2002, 136 p.

KITAMURA, H; FUKUMOTO, M. Management system supporting reliability of equipment. *Kawasaki Steel Giho*, n. 33, 2001, pp. 6-9.

KUMAR, U. Dinesh. Analysis of fault tolerant systems operating under different stress levels during a mission. *International Journal of Quality & Reliability Management*, v. 14, n. 9, 1997, pp. 899-908.

KUMAR, U. Dinesh. New trends in aircraft reliability and maintenance measures. *Journal of Quality in Maintenance Engineering*. v. 5, n. 4, 1999, pp 287-295.

KUMAR, U. D.; KNEZEVIC, J. Supportability - critical factor on systems' operational availability. *International Journal of Quality & Reliability Management*, v. 15, n. 4, 1998, pp. 366-376.

LAFRAIA, J.R.C. *Manual de Confiabilidade, Mantenabilidade e Disponibilidade*, Rio de Janeiro: Qualitymark Editora Ltda., 2001, 388 p.

LAKATOS, E.V.; MARCONI, M.A . *Fundamentos de Metodologia Científica*. 3ª ed. rev. ampl. São Paulo: Atlas, 1991, 270 p.

MADU, Christian N. Reliability and quality interface. *International Journal of Quality & Reliability Management*, v. 16, n. 7, 1999, pp. 691-698.

MARCORIN, Adilson J., *Aplicação dos Métodos de Kaplan-Meier e Bootstrap na análise de confiabilidade de produtos baseada em dados de campo*, 2002. 94 p. Monografia (Mestrado em Engenharia de Produção). Universidade Metodista de Piracicaba – UNIMEP, Santa Bárbara d'Oeste – SP.

McLACHLAN, V. N. Errors - their origin and avoidance to increase system reliability. *The TQM Magazine*. v. 7, n. 5, 1995, pp. 26-31.

MIRSHAWKA, V; OLMEDO, N.C. *Manutenção – Combate aos Custos na Não-eficácia – A vez do Brasil*, São Paulo: Editora McGraw-Hill Ltda., 1993, 373 p.

MOUBRAY, John. *Manutenção Centrada em Confiabilidade (Reliability-Centred Maintenance – RCM)*. Traduzido por Kleber Siqueira, Edição Brasileira, Editora Aladon Ltd., 2000, 426 p.

MÜLLER, R.; SCHWARZ, E. *Confiabilidade - tabelas e nomogramas para uso prático*. São Paulo: Editora Nobel, 1987, 89 p.

MURTY, A .S.R.; NAIKAN, V.N.A. Availability and Maintenance Cost Optimization of a Production Plant, *International Journal of Quality & Reliability Management,* v. 12, n. 2, 1995, pp. 28-35.

MURTHY, D. N. P.; ATRENS, A; ECCLESTON, J. A . Strategic maintenance management, *Journal of Quality in Maintenance Engineering*. v. 8, n. 4, 2002, pp 287-305.

OLIVEIRA, M.R.; LIMA, C.R.C. Integração da manutenção na produção: uma estratégia competitiva ou utopia?, in anais do *XXII Encontro Nacional de Engenharia de Produção*, Curitiba, 23 a 25 de outubro de 2002, CD ROM, 6 p.

OSADA, Takashi. *Housekeeping, 5S: seiri, seiton, seiso, seiketsu, shitsuke*. São Paulo: IMAM, 1992, 212 p.

PIAZZA, Gilberto, *Introdução à engenharia da confiabilidade*, Caxias do Sul: EDUCS, 2000, 128 p.

PINTELON, L.; NAGARUR, N.; PUYVELDE, F. V. Case study: RCM - yes, no or maybe?, *Journal of Quality in Maintenance Engineering*, v. 5, n. 3, 1999, pp. 182-191.

PINTO, A. K., XAVIER, J.A.N. *Manutenção – Função Estratégica*, 2ª. Ed., Rio de Janeiro: Editora Qualitymark Ltda., 2001, 341 p.

PRENDERGAST, J.; MURPHY, E.; STEPHENSON, M. Building-in reliability - implementation and benefits. *International Journal of Quality & Reliability Management*. v. 13, n. 5, 1996, pp. 77-90.

RAGAZZI, Sidnei. *Confiabilidade*. Apostila elaborada pelo autor para treinamento aplicado nas Indústrias Romi S.A., Campinas, Setembro de 2001, 100 p.

SAE INTERNATIONAL. *Reliability and Maintainability Guideline for Manufacturing Machinery and Equipment*, USA: Society of Automotive Engineers, Inc e National Center for Manufacturing Sciences, Inc, 1992, 92 p.

SARANGA, Haritha. Relevant condition-parameter strategy for an effective condition-based maintenance, *Journal of Quality in Maintenance Engineering*. v. 8, n. 1, 2002, pp 92-105.

SMITH, Anthony M. *Reliability-Centered Maintenance*, Boston, USA: Editora McGraw Hill, 1993, 216 p.

SOURIS, J-P. *Manutenção Industrial – Custo ou Benefício*. Tradução de Elizabete Batista, Lisboa: Ed. Lidel – Edições Técnicas Ltda., 1992, 173 p.

SOUZA, S.S.; LIMA, C.R.C. Manutenção centrada em confiabilidade como ferramenta estratégica, in anais do *XXIII Encontro Nacional de Engenharia de Produção*, Ouro Preto, 21 a 24 de outubro de 2003, CD ROM, 8 p.

SRIDHARAN, V.; MOHANAVADIVU, P. On the characteristics of a protective two-unit system. *International Journal of Quality & Reliability Management*, v.15, n. 7, 1998, pp. 712-718.

STEWART, Mark G. reliability-based assessment of aging bridges using risk ranking and life cycle cost decision analyses. *Reliability Engineering & System Safety*, n. 74, 2001, pp. 263-273.

TAKAHASHI, Yoshikazu; OSADA, Takashi. *Manutenção Produtiva Total*; Tradução Outras Palavras, São Paulo: Instituto IMAM, 1993, 322 p.

TENNANT, Charles. Quality and reliability through common business environment. *The TQM Magazine*. v. 7, n. 5, 1995, pp. 7-15.

TENG, Sheng-Hsien; HO, Shin-Yann. Failure Mode and Effects Analysis – An integrated approach for product design and process control. *International Journal of Quality & Reliability Management*, v. 13, n. 5, 1996, pp. 8-26.

TUMMALA, V. M. R.; LEUNG, Y. H. A risk management model assess safety and reliability risks. *International Journal of Quality & Reliability Management.* v. 13, n. 8, 1996, pp. 53-62.

VIANA, H. R. G. *PCM, Planejamento e Controle de Manutenção*, Rio de Janeiro: Qualitymark Ed., 2002, 192 p.

XENOS, Harilaus G.P. *Gerenciando a Manutenção Produtiva*, Belo Horizonte: Editora de Desenvolvimento Gerencial, 1998, 302 p.

XIE, M.; TAN, K. C.; GOH, K. H. Optimum prioritization and resource allocation based on fault tree analysis. *International Journal of Quality & Reliability Management*, v. 17, n. 2, 2000, pp.189-199.

WAEYENBERG, G.; PINTELON, L.; GELDERS, L. JIT and maintenance. Artigo publicado na coleção Maintenance, Modeling and Optimization. Boston, USA: Kluwer Academic Publisher, 2000, pp. 439-470.

WANG, Y.; JIA, Y.; YU, J.; YI, S. Field Failure Database of CNC Lathes. *International Journal of Quality & Reliability Management,* v. 16, n. 4, 1999, pp. 330-340.

WILLIAMS, J.H.; DAVIS, A.; DRAKE, P.R. *Condition-based Maintenance and Machine Diagnostics*, Londres: Editora Chapman & Hall, 1994, 187 p.

WIREMAN, Terry. *World Class Maintenance Management*, New York: Industrial Press, Inc., 1990, 171 p.